



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria
de Manresa

6-7-2018

Treball Final de Grau

Estudi mitjançant CFD de la implantació
de millores aerodinàmiques en vehicles
de competició.

Grau en Enginyeria Industrial Mecànica

Autor: Raül Vallès Carvajal

Tutor: Jordi Vives Costa

Centre: Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa

ÍNDEX

RESUM	9
RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
AGRAÏMENTS	12
GLOSSARI: TERMES I ABREVIACIONS.....	13
1. INTRODUCCIÓ	15
1.1. Origen del projecte	16
1.2. Motivació personal	17
1.3. Objectius principals.....	18
1.4. Abast del projecte	18
2. AERODINÀMICA.....	19
2.1. Història de l'aerodinàmica	20
2.1.1. Evolució de l'aerodinàmica en vehicles de competició.....	21
2.1.2. El túnel de vent.....	25
2.2. Teoria de l'aerodinàmica	28
2.2.1. Principi de Bernoulli.....	28
2.2.2. Nombre de Reynolds	32
2.2.3. La capa límit.....	33
2.3. Forces aerodinàmiques.....	35
2.3.1. Resistència aerodinàmica “Drag”	36
2.3.2. Força de sustentació “Lift i Downforce”	36
3. ELEMENTS AERODINÀMICS	37
3.1. Els Spoilers	39
3.1.1. Spoilers Posteriors	39
3.1.2. Spoilers Davaners	40
3.1.3. Divisors de flux.....	40
3.2. L'Aleró	41
3.2.1. Terminologia dels alerons	41
3.2.2. Funcionament.....	41

3.2.3.	Tipus de alerons.....	42
3.3.	El fons pla	43
3.3.1.	Factors del disseny d'un fons pla	43
3.3.2.	Elements addicionals del fons pla	44
3.4.	El difusor	45
3.4.1.	Funcionament del difusor.....	45
4.	EL DTM.....	46
4.1.	Introducció al DTM	48
4.2.	Història i evolució	49
4.2.1.	Deutsche Tourenwagen Meisterschaft (1984-1996)	49
4.2.2.	Deutsche Tourenwagen Masters (2000-Actualitat)	49
5.	DISSENY DEL TURISME DE SERIE.....	50
5.1.	Elecció del turisme de sèrie	51
5.2.	Disseny 3D del turisme de sèrie.....	52
5.2.1.	Disseny de les superfícies	54
6.	SIMULACIÓ DEL TURISME DE SERIE.....	65
6.1.	Anàlisi aerodinàmic del turisme de sèrie	66
6.1.1.	Simulació de les pressions	67
6.1.2.	Simulació de les velocitats.....	71
6.1.3.	Simulació vectorial.....	73
6.2.	Resum de resultats del anàlisi CFD	76
7.	MILLORES AERODINÀMIQUES	79
7.1.	Elecció dels components aerodinàmics.....	80
7.2.	Fons pla	81
7.3.	Spoilers.....	82
7.3.1.	Splitter	82
7.3.2.	Spoilers laterals	83
7.4.	Difusor.....	84
7.5.	Aleró.....	85
8.	MODEL DE DTM	86
8.1.	Comparació dels models.....	88
9.	SIMULACIÓ DEL TURISME DE DTM.....	90

9.1.	Anàlisi aerodinàmic del turisme de DTM	91
9.1.1.	Simulació de les pressions	92
9.1.2.	Simulació de les velocitats	96
9.1.3.	Simulació vectorial.....	98
9.2.	Resum de resultats del anàlisi CFD	100
10.	ANÀLISIS DELS RESULTATS.....	103
10.1.	Comparació dels resultats	104
10.2.	Comparació dels rendiments	105
10.2.1.	Comparació de la força del Drag.....	105
10.2.2.	Comparació de la Pressió Màxima	107
10.2.3.	Comparació de la Pressió Mínima	108
11.	PLANIFICACIÓ DEL PROJECTE	111
12.	CONCLUSIONS	114
13.	BIBLIOGRAFIA	115

ÍNDEX D'IL·LUSTRACIONS

Il·lustració 1: Porsche Spyder amb aleró (1956).....	21
Il·lustració 2: Ferrari 312 del 1968.....	22
Il·lustració 3: Chaparral 2E amb aleró, 1966.	22
Il·lustració 4: '69 Datsun 240z, primer aleró en un cotxe de sèrie.....	23
Il·lustració 5: Lotus '79, cotxe i esquema del fons pla.....	23
Il·lustració 6: Baixos d'un Formula 1.	24
Il·lustració 7: Simulació del flux d'aire en el túnel de vent de Ferrari.....	25
Il·lustració 8: Esquema d'un túnel de vent.	26
Il·lustració 9: Il·lustració del principi de Bernoulli.....	29
Il·lustració 10: Flux d'aire a través d'un ala.	30
Il·lustració 11: Mapa de pressions de l'aire a través de l'ala d'un avió.	30
Il·lustració 12: Propietats de l'aire en passar per la part inferior d'un F1.....	31
Il·lustració 13: Visualització d'un flux laminar	32
Il·lustració 14: Visualització d'un flux turbulent.....	32
Il·lustració 15: Flux adherit i flux separat.	33
Il·lustració 16: Evolució de la capa límit al llarg d'una superfície.....	34
Il·lustració 17: Generadors de vòrtex en l'aleró d'un Fórmula 1.....	34
Il·lustració 18: Forces aerodinàmiques en un automòbil.....	35
Il·lustració 19: Similitud entre el perfil d'un cotxe i el perfil alar.	38
Il·lustració 20: Distribució aproximada de la càrrega aerodinàmica en un F1.....	38
Il·lustració 21: Reducció del Drag amb la instal·lació d'un Spoiler posterior.....	39
Il·lustració 22: Esquematzació del funcionament d'un spoiler davanter.....	40
Il·lustració 23: Divisor de flux frontal Mercedes DTM.....	40
Il·lustració 24: Terminologia del perfil de l'ala d'un avió.	41
Il·lustració 25: Pressió al voltant d'un aleró.	41
Il·lustració 26: Perfil d'un aleró d'un element.....	42
Il·lustració 27: Perfil d'un aleró de dos elements.....	42
Il·lustració 28: Comparació del fons pla d'un F1 amb un cotxe de carrer.....	43
Il·lustració 29: Inclinació del fons pla d'un cotxe.	44
Il·lustració 30: Túnel d'aire del Lotus del '79.....	44
Il·lustració 31: Reducció de la velocitat del flux en un difusor.....	45
Il·lustració 32: Reducció de la pressió del flux en un difusor.	45
Il·lustració 33: Audi RS5, cotxe campió de l'edició 2017 del DTM.	48
Il·lustració 34: BMW M6 GT3 DTM.....	51
Il·lustració 35: BMW M6 Grand Coupe.....	51
Il·lustració 36: Vista lateral BMW M6 Grand Coupe.	52
Il·lustració 37: Vista posterior BMW M6 Grand Coupe.....	52

Il·lustració 38: Vista frontal BMW M6 Grand Coupe.....	52
Il·lustració 39: Vista superior BMW M6 Grand Coupe.	53
Il·lustració 40: Esbossos del BMW M6 col·locats en posició.	53
Il·lustració 41: Creació de les superfícies del model CAD – 1 (línia projectada).	54
Il·lustració 42: Creació de les superfícies del model CAD – 2 (capó).	54
Il·lustració 43: Creació de les superfícies del model CAD – 4 (far).....	55
Il·lustració 44: Creació de les superfícies del model CAD – 5.....	56
Il·lustració 45: Creació de les superfícies del model CAD – 6 (frontal).	56
Il·lustració 46: Creació de les superfícies del model CAD – 7 (porta).	57
Il·lustració 47: Creació de les superfícies del model CAD – 8 (faldó).	57
Il·lustració 48: Creació de les superfícies del model CAD – 9 (error).	58
Il·lustració 49: Creació de les superfícies del model CAD – 10 (aleta posterior).	58
Il·lustració 50: Creació de les superfícies del model CAD – 12 (sostre).	59
Il·lustració 51: Creació de les superfícies del model CAD – 11 (lateral).....	59
Il·lustració 52: Creació de les superfícies del model CAD – 13 (maleter i vidres).	60
Il·lustració 53: Creació de les superfícies del model CAD – 14 (carrosseria completa). 60	
Il·lustració 54: Creació de les superfícies del model CAD – 15 (fons pla).	61
Il·lustració 55: Creació de les superfícies del model CAD – 15 (cosit superficial).	61
Il·lustració 56: Creació de les superfícies del model CAD – 16 (simetria).	62
Il·lustració 57: Creació de les superfícies del model CAD – 17 (carrosseria completa). 62	
Il·lustració 58: Creació de les superfícies del model CAD – 18 (rodes).	63
Il·lustració 59: Creació de les superfícies del model CAD – 20 (fons abrupte).	63
Il·lustració 60: Model CAD BMW M6.....	64
Il·lustració 61: Model CAD importat al simulador Flow Design.	66
Il·lustració 62: Modificació dels marges del túnel de vent.....	66
Il·lustració 63: Pressió al voltant del cotxe de sèrie a 15m/s.	67
Il·lustració 64: Pressió en la superfície del cotxe de sèrie a 15m/s.....	68
Il·lustració 65: Pressió al voltant del cotxe de sèrie a 25m/s.	68
Il·lustració 66: Pressió en la superfície del cotxe de sèrie a 25m/s.....	69
Il·lustració 67: Pressió al voltant del cotxe de sèrie a 50m/s.	69
Il·lustració 68: Pressió en la superfície del cotxe de sèrie a 50m/s.....	70
Il·lustració 69: Pressió al voltant del cotxe de sèrie a 80m/s.	70
Il·lustració 70: Pressió en la superfície del cotxe de sèrie a 80m/s.....	71
Il·lustració 71: Velocitat del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 15m/s.....	71
Il·lustració 72: Velocitat del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 25m/s.....	72
Il·lustració 73: Velocitat del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 50m/s.....	72
Il·lustració 74: Velocitat del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 80m/s.....	73
Il·lustració 75: Trajectòria del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 15m/s.....	73
Il·lustració 76: Trajectòria del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 25m/s.....	74
Il·lustració 77: Trajectòria del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 50m/s.....	74
Il·lustració 78: Trajectòria del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 80m/s.....	75

Il·lustració 79: Gràfica de la força total del Drag en el BMW M6.....	76
Il·lustració 80: Gràfica de la pressió màxima en el BMW M6.	77
Il·lustració 81: Gràfica de la pressió mínima en el BMW M6.	77
Il·lustració 82: Gràfica de la velocitat màxima del flux en el BMW M6.	78
Il·lustració 83: Elements aerodinàmics a introduir.	80
Il·lustració 84: Elements aerodinàmic introduïts - Fons pla 1.....	81
Il·lustració 85: Elements aerodinàmic introduïts - Fons pla 2.....	81
Il·lustració 86: Elements aerodinàmic introduïts - Splitter 1.	82
Il·lustració 87: Elements aerodinàmic introduïts - Splitter 2.	82
Il·lustració 88: Elements aerodinàmic introduïts - Spoiler lateral 1.....	83
Il·lustració 89: Elements aerodinàmic introduïts - Spoiler lateral 2.....	83
Il·lustració 90: Elements aerodinàmic introduïts - Difusor 1.....	84
Il·lustració 91: Elements aerodinàmic introduïts - Difusor 2.....	84
Il·lustració 92: Elements aerodinàmic introduïts - Aleró 1.....	85
Il·lustració 93: Elements aerodinàmic introduïts - Aleró 2.....	85
Il·lustració 94: Model DTM Final 1.....	87
Il·lustració 95: Model DTM Final 2.....	87
Il·lustració 96: Comparació de models : Vista lateral.	88
Il·lustració 97: Comparació de models : Vista frontal.	88
Il·lustració 98: Comparació de models : Vista superior.....	89
Il·lustració 99: Comparació de models.	89
Il·lustració 100: Model DTM importat al simulador Flow Design.....	91
Il·lustració 101: Pressió al voltant del cotxe de DTM a 15m/s.	92
Il·lustració 102: Pressió en la superfície del cotxe de DTM a 15m/s.....	92
Il·lustració 103: Pressió al voltant del cotxe de DTM a 25m/s.	93
Il·lustració 104: Pressió en la superfície del cotxe de DTM a 25m/s.....	93
Il·lustració 105: Pressió al voltant del cotxe de DTM a 50m/s.	94
Il·lustració 106: Pressió en la superfície del cotxe de DTM a 50m/s.....	94
Il·lustració 107: Pressió al voltant del cotxe de DTM a 80m/s.	95
Il·lustració 108: Pressió en la superfície del cotxe de DTM a 80m/s.....	95
Il·lustració 109: Velocitat del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 15m/s.....	96
Il·lustració 110: Velocitat del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 25m/s.....	96
Il·lustració 111: Velocitat del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 50m/s.....	97
Il·lustració 112: Velocitat del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 80m/s.....	97
Il·lustració 113: Trajectòria del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 15m/s.....	98
Il·lustració 114: Trajectòria del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 25m/s.....	98
Il·lustració 115: Trajectòria del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 50m/s.....	99
Il·lustració 116: Trajectòria del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 80m/s.....	99
Il·lustració 117: Gràfica de la força total del Drag en el BMW DTM.	100
Il·lustració 118: Gràfica de la pressió màxima en el BMW DTM.	101
Il·lustració 119: Gràfica de la pressió mínima en el BMW DTM.....	101

Il·lustració 120: Gràfica de la velocitat màxima del flux en el BMW DTM.	102
Il·lustració 121: Gràfica comparativa de la força total del Drag.	105
Il·lustració 122: Zones d'alta pressió en el frontal del cotxe.	106
Il·lustració 123: Zones de depressió en l'estela del cotxe.	106
Il·lustració 124: Turbulències en l'estela del cotxe.	106
Il·lustració 125: Gràfica comparativa de la pressió màxima.	107
Il·lustració 126: Zona d'alta pressió frontal.	107
Il·lustració 127: Gràfica comparativa de la pressió mínima.	108
Il·lustració 128: Pic de velocitat en el fons del vehicle.	108
Il·lustració 129: Pic de depressió en el fons del vehicle.	108
Il·lustració 130: Comparació de les velocitats en el fons dels vehicles.	109
Il·lustració 131: Comparació de les pressions en el fons dels vehicles.	110
Il·lustració 132: Diagrama de Gantt del temps dedicat al projecte.	113

RESUM

Aquest projecte es centra en l'aerodinàmica aplicada als vehicles i, en especial, als vehicles de competició. A grans trets el treball es divideix en 3 parts destacades dedicades a l'estudi i comprensió de l'aerodinàmica, el disseny CAD i la simulació CFD.

La primera part del projecte està destinada a la comprensió de les lleis i principis aerodinàmics aplicats al món automobilístic així com a al repàs de la història de l'aparició d'aquesta branca de la física en món de la competició de motor i el seu recorregut fins a l'actualitat passant per les innovacions i esdeveniments més importants que ha generat.

La segona part del projecte està destinada al disseny i modelació dels vehicles i dels seus components aerodinàmics. Aquesta fase inclou des de l'elecció del vehicle de carrer (sense modificacions) i la seva modelació CAD mitjançant un programa que permet la creació de superfícies sòlides com es el SolidWorks fins a la creació dels elements aerodinàmics pertinents i el disseny final del vehicle de competició.

La tercera part està destinada al anàlisi aerodinàmic dels dos models dissenyats mitjançant programes de simulació d'Autodesk com el Flow Design. Aquesta és en si la part més important ja que ens ha permès veure les millores aerodinàmiques i treure conclusions sobre la seva importància ja sigui en el món de la competició o en la seva aplicació en el món del automòbil de carrer.

Finalment s'ha pogut entendre i comprovar part dels principis teòrics aplicats a l'aerodinàmica i s'ha observat de forma molt clara quins són els grans beneficis que aporten els diferents elements estudiats així com alguns dels desavantatges que comporta la instal·lació d'aquests elements.

RESUMEN

Este proyecto se centra en la aerodinámica aplicada a los vehículos y, en especial, a los vehículos de competición. A grandes rasgos el trabajo se divide en 3 partes destacadas dedicadas al estudio y comprensión de la aerodinámica, el diseño CAD y la simulación CFD.

La primera parte del proyecto está destinada a la comprensión de las leyes y principios aerodinámicos aplicados al mundo automovilístico, así como el repaso de la historia de la aparición de esta rama de la física en el mundo de la competición de motor y su recorrido hasta la actualidad pasando por las innovaciones y eventos más importantes que ha generado.

La segunda parte del proyecto está destinada al diseño y modelación de los vehículos y de sus componentes aerodinámicos. Esta fase incluye desde la elección del vehículo de calle (sin modificaciones) y su modelación CAD mediante un programa que permite la creación de superficies sólidas como es el SolidWorks hasta la creación de los elementos aerodinámicos pertinentes y el diseño final del vehículo de competición.

La tercera parte está destinada al análisis aerodinámico de los dos modelos diseñados mediante un programa de simulación de Autodesk como el Flow Design. Esta es en sí la parte más importante ya que nos ha permitido analizar las mejoras aerodinámicas y sacar conclusiones sobre su importancia ya sea en el mundo de la competición o en su aplicación en el mundo del automóvil de calle.

Finalmente se ha podido entender y comprobar parte de los principios teóricos aplicados a la aerodinámica y se ha observado de forma muy clara cuáles son los grandes beneficios que aportan los diferentes elementos estudiados, así como algunos de las desventajas que conlleva la instalación de estos elementos.

ABSTRACT

This project focuses on aerodynamics applied to vehicles and, especially, to competing vehicles. Broadly speaking, the work is divided into 3 featured parts dedicated to the study and understanding of aerodynamics, CAD design and CFD simulation.

The first part of the project is about the laws and aerodynamic principles applied to the automobile world as well as reviewing the history of the implementation of this branch of physics into the motor competition world and its evolution until the present focusing in the most important innovations and events that it has generated.

The second part of the project is aimed at the design and modelling of vehicles and their aerodynamic components. This phase goes from the choice of the initial vehicle (without modifications) and its CAD modelling through a program that allows the creation of solid surfaces such as SolidWorks, until the creation of the aerodynamic elements and the final design of the vehicle of competition.

The third part is devoted to the aerodynamic analysis of the two CAD models through an Autodesk simulation program such as Flow Design. That is the most important part of the project since it allows us to analyse the aerodynamic modifications and improvements and take some conclusions about its importance in the competition world or in its application in the street automobiles.

Finally, it has been possible to understand and verify part of the theoretical principles applied to aerodynamics as well as checking what are the benefits and disadvantages of the different elements studied.

AGRAÏMENTS

Després d'aquest període de pràcticament tres mesos i mig, avui és el dia en que escric aquest apartat d'agraïments i dono per acabat el meu treball de final de grau. Ha estat un període d'aprenentatge molt intens i enriquidor, tant a nivell tècnic com a nivell personal. Escriure aquest treball ha tingut un gran impacte personal ja que és fins al moment el treball més complex que he realitzat i és per això que volia agrair a totes aquelles persones que m'han ajudat i recolzat durant tots aquets mesos.

Primerament, m'agradaria donar les gràcies al meu tutor Jordi Vives per la seva motivació i col·laboració. Agrair sobretot l'aportació inicial d'idees, quan anava molt perdut sobre el possible tema del treball, que em van permetre decidir-me i encaminar el projecte amb uns punts molt clars i marcats que m'han facilitat moltíssim la recerca d'informació i l'estructuració del treball.

També m'agradaria agrair als meus familiars i amics que sempre m'han estat animant i donant idees molt valuoses que m'han ajudat a fer molt més suportable tot el procés.

Finalment, m'agradaria agrair també a tots el professors que he tingut al llarg d'aquests anys de grau la tasca realitzada donant classes d'una forma molt propera que ajuda molt tant en la motivació i l'interès dels alumnes com en la comprensió del temari.

Moltes gràcies a tots!

Raul Vallès Carvajal

04/07/2018

GLOSSARI: TERMES I ABREVIACIONS

Aerodinàmica: Estudi de la interacció entre l'aire y un cos sòlid que es mou a través d'aquest. En el context d'aquest projecte el "cos sòlid" fa referència exclusivament a automòbils.

Aleró: Sinònim d'ala, es un element que té la forma oposada al perfil alar d'un avió i que s'utilitza per crear una certa càrrega aerodinàmica.

Downforce: El downforce o càrrega aerodinàmica és una força que actua sobre un vehicle i que té l'efecte de pressionar-lo cap a terra. El propòsit del downforce és permetre que el cotxe tingui un pas per corba més ràpid augmentant la força vertical sobre els pneumàtics, creant així més adherència.

Spoiler: És un dispositiu creat per disminuir la força de sustentació positiva que es genera en els vehicles degut a l'augment de la velocitat del flux.

Splitter (Divisor de flux): El divisor de flux o splitter és un element aerodinàmic instal·lat en la part frontal del cotxe. S'utilitza per augmentar la càrrega aerodinàmica i el seu propòsit és actuar com a punt d'estancament on la velocitat del flux sigui zero.

Cockpit: Espai on es troba el pilot i des de on condueix el vehicle.

CFD (Computational Fluid Dynamics): És una branca de la mecànica de fluids que utilitza anàlisis numèric i estructures de dades per resoldre i analitzar problemes que impliquen fluxos de fluids.

CAD (Computer-Aided Drafting or Designing): És l'ús d'ordinadors per a assistir en el dibuix o en el disseny d'un producte.

DTM (Deutsche Tournament Masters): És una competició on s'utilitzen turismes semblants als cotxes de producció en sèrie als quals se'ls aplica una sèrie de modificacions per millorar el seu rendiment.

Drag: És una força que actua de forma oposada al moviment relatiu de qualsevol objecte que es mou en un fluid, es a dir, és una força que genera una resistència a l'avanç. En el context d'aquest projecte aquest fluid és l'aire.

Flux laminar: Moviment ordenat i paral·lel d'un fluid, aire en el context d'aquest projecte, que facilita el seu estudi i predicció.

Flux turbulent: Moviment ordenat i paral·lel d'un fluid que facilita el seu estudi i predicció.

Difusor: Moviment caòtic i desordenat d'un fluid que dificulta la predicció de la trajectòria de les partícules.

Fons pla: El fons pla és probablement l'element aerodinàmic més important d'un cotxe de curses. Normalment estan modelats en una única peça de fibra de carboni i la seva principal funció és la de fer passar l'aire per sota del cotxe a la major velocitat possible, generant així una zona de baixa pressió que pega el cotxe a terra.

Mach: El nombre de Mach és el quocient entre la velocitat d'un objecte en un medi determinat i la velocitat del so en aquell mateix medi.

Capa límit: És la zona on el moviment d'un fluid és pertorbat per la presència d'un sòlid amb el qual està en contacte. La capa límit s'entén com aquella zona en la qual la velocitat del fluid respecte al sòlid en moviment varia des de zero fins al 99% de la velocitat del corrent.

Lift (C_L): És una força aerodinàmica perpendicular a l'avanç del vehicle. Pot ser positiva com en els cas dels avions o negativa (downforce) en casos com els dels automòbils de competició.

C_D (Coeficient de Resistència): És una quantitat adimensional que s'utilitza per quantificar l'arrossegament o resistència d'un objecte en un medi fluid com l'aire o l'aigua.

Viscositat: La viscositat d'un fluid és una mesura de la seva resistència a les deformacions graduals

Flap: Dispositiu utilitzat per augmentar la corda del perfil alar maximitzant així l'efecte de sustentació.

Corda del Perfil: És una línia recta imaginària que uneix el vèrtex de sortida amb el centre de curvatura del punt d'atac d'un perfil alar.

FIA: La Federació Internacional de l'Automòbil és una organització sense ànim de lucre que inclou 268 organitzacions automobilístiques de 143 països. És mundialment coneguda per regular les competicions d'automobilisme més importants del món.

1. INTRODUCCIÓ

INTRODUCCIÓ

En l'actualitat existeix una creixent preocupació alhora de dissenyar i fabricar vehicles degut a la cada cop més limitada quantitat de recursos energètics disponibles i el cost cada cop més elevat d'aquests. Això ha fet que, per tal de reduir costos en el transport, l'estudi de l'aerodinàmica s'hagi convertit en una de les parts més fonamental alhora de definir el disseny d'un vehicle amb l'objectiu d'intentar aprofitar al màxim els beneficis que aquesta proporciona.

Ja sigui per tal d'intentar reduir les emissions generades per la combustió dels vehicles o per intentar evitar al màxim els problemes mediambientals i de salut que comporten l'emissió de gasos a l'atmosfera, les normatives internacionals que regulen els consums de combustibles s'estan tornant cada cop més estrictes i difícils de complir.

Degut a que un bon disseny aerodinàmic pot comportar notables millores en el rendiment del vehicle disminuït de forma molt important el seu consum de combustible i, per conseqüència, l'emissió d'elements contaminants derivats de la combustió a l'atmosfera, els fabricants es veuen obligats a intentar millorar al màxim l'aerodinàmica dels seus vehicles per tal de ajudar a complir les normatives d'emissions.

L'elevat cost dels prototips i la utilització d'instal·lacions com el túnel de vent per a l'estudi de l'aerodinàmica lligat als grans avenços tecnològics en matèria de simulació ha comportat un increment exponencial dels estudis i simulacions mitjançant softwares CFD. Aquests permeten simular amb exactitud el comportament del flux d'aire en relació al vehicle en moviment permetent, per tant, conèixer amb antelació els coeficients aerodinàmics així com possibles millores i/o variacions en el disseny que puguin ajudar a millorar el flux d'aire disminuint les pèrdues i augmentant el rendiment general del vehicle.

1.1. Origen del projecte

En els últims anys s'han produït un gran nombre de millores i avenços en relació al programari tant de disseny 3D com de simulació ja sigui de fluids, d'esforços, de moviment, etc. Això ha comportat que qualsevol persona que disposi d'un ordinador pugui utilitzar eines que fins fa pocs anys només estaven a l'abast dels professionals del sector que disposaven d'equips molt sofisticats i costosos. Això ha obert un gran nombre de possibilitats per estudiar l'aerodinàmica a nivell d'estudiants i/o particulars sense gaires complicacions.

El fet de tindre aquest tipus de programari tècnic a disposició juntament amb la creixent demanda de professionals amb domini i coneixements en aquest sector va ser un dels punts claus en la decisió d'encaminar el projecte en aquesta direcció, ja que la realització del projecte em permetria experimentar una mica amb el programari tant CAD com CFD i adquirir coneixements i experiència en relació al camp de l'aerodinàmica i del disseny en general.

En un principi hi havia 3 disciplines del món de la competició de motor que em van cridar especialment l'atenció: la Fórmula 1, els Ral·lis i el DTM (Deutsche Tournament Masters). Finalment i després de descartar la Fórmula 1 per la dificultat tècnica en el disseny i la poca informació disponible, la disciplina esportiva triada per fer l'estudi de les millores aerodinàmiques va ser el DTM, es va prendre aquesta decisió ser degut a que en aquesta competició s'utilitzen models de vehicles de fabricació en sèrie (BMW, Mercedes, Audi, etc.), dels quals podem trobar molta informació tècnica i esbossos per tal de poder fer-ne el 3D, als quals se'ls afegeixen una sèrie de modificacions tant estructurals com aerodinàmiques que els permeten millorar molt les prestacions dels vehicles i adaptar-los a les necessitats de la competició. Cal dir també que un dels punts que em va fer decantar-me cap al DTM en detriment dels ral·lis és el component aerodinàmic, el qual és molt més important que en disciplines OFF-Road com els ral·lis ja que les competicions del DTM són en circuits asfaltats on s'agafen velocitats molt elevades tant en rectes com en pas per corba.

1.2. Motivació personal

Apassionat del món del motor i del disseny CAD vaig veure una gran oportunitat amb l'elecció d'un projecte que engloba aquestes dues matèries i que em podria permetre millorar notablement els coneixements en matèria aerodinàmica així com practicar la modelació CAD mitjançant superfícies amb un dels programes de disseny 3D més utilitzat com és el SolidWorks.

Personalment em motiva molt aquest projecte ja que em permet aprendre a utilitzar una part del programari encarregat de simular les condicions aerodinàmiques dels vehicles com és el Flow Design d'Autodesk.

Tot i que la creixent demanda d'enginyers amb coneixements tant de disseny CAD com de simulació m'ha aportat un extra alhora de decidir encaminar el projecte cap aquesta matèria, el que més m'ha cridat l'atenció ha sigut la possibilitat de realitzar un treball amb un gran component pràctic i d'experimentació.

1.3. Objectius principals

L'objectiu principal alhora de realitzar aquest projecte es el d'aprofundir en els coneixements sobre aerodinàmica adquirits durant el grau alhora que apreng una mica sobre la història d'aquesta matèria i la seva implicació tant en els vehicles de competició com en els de carrer.

Un altre dels objectius es el d'aprendre a modelar superfícies amb programari CAD ja que tant en el grau com en les pràctiques que vaig realitzar en una empresa de disseny de maquinaria, pràcticament només he fet modelació de sòlids amb alguna pinzellada petita de superfícies.

Finalment està l'objectiu d'iniciar-me en software CFD de simulació de fluids.

1.4. Abast del projecte

El projecte constarà de les següents fases:

- Teoria i història de l'aerodinàmica.
- Teoria i història dels elements aerodinàmics més utilitzats en el món de la competició automobilística.
- Disseny CAD.
 - Disseny del cotxe de sèrie (sense modificacions).
 - Disseny dels elements aerodinàmics a implementar.
 - Disseny final del cotxe de competició amb tots els elements inclosos.
- Simulació aerodinàmica dels diversos models CAD amb un software CFD.
- Comparació i anàlisis dels resultats obtinguts

2. AERODINÀMICA

AERODINÀMICA

L'aerodinàmica es una branca de la física que s'encarrega d'estudiar els diversos fenòmens que s'originen com a conseqüència d'un moviment relatiu entre un fluid (gas o aire) i un cos.

Degut a la dificultat tècnica que comporta l'estudi del moviment de fluids gasosos com l'aire, el desenvolupament de l'aerodinàmica en els vehicles ha estat molt lenta al llarg de la història. En els últims anys la creixent evolució de la tecnologia, ja sigui amb la millora d'instal·lacions com el túnel de vent o la aparició de programes que permeten simular la trajectòria dels fluids juntament amb una preocupació cada cop més elevada per millorar rendiments i estalviar energia, ha comportat un augment exponencial dels estudis aerodinàmics.

2.1. Història de l'aerodinàmica

Tot i que actualment l'aerodinàmica és un punt essencial a tindre en compte en el disseny de tot tipus de vehicles, els fabricants dels primers automòbils no van donar gaire importància a l'aerodinàmica fins a mitjans del segle passat. L'evolució en el disseny dels automòbils ha anat avançant a passos agegantats a partir dels anys 50-60, segona meitat del s.XX, per tal d'anar disminuint gradualment la resistència a l'avanç dels vehicles (C_x), amb tots els beneficis que això comporta i millorar aspectes com l'estabilitat reduint altres efectes com el de la sustentació.

El primer automòbil que va intentar millorar dràsticament la seva aerodinàmica va ser el Rumpler-Tropfen auto (cotxe de llàgrima) creat per l'inventor alemany Edmund Rumpler. Aquest enginyer va dissenyar el 1914 un vehicle basant-se en la forma d'un element tant natural com és una gota d'aigua, primant així, les línies corbes sobre les rectes que es portaven en aquella època. Aquest innovador cotxe va aconseguir un coeficient de fricció o (C_d) de només 0,27.

Com ja s'ha dit anteriorment no va ser fins l'època dels anys 50-60 quan es van començar a fer els avenços més importants en el món de l'aerodinàmica gràcies al creixement del món de la competició.

2.1.1. Evolució de l'aerodinàmica en vehicles de competició

Degut a que l'impacte de l'aerodinàmica en el món de la competició automobilística és d'extrema importància i que aquest sector té una gran capacitat tècnica, es pot dir amb certesa que el món de la competició ha sigut, és, i serà sempre el gran banc de prova de les possibles millores aerodinàmiques en els vehicles.

Els primers enginyers dedicats als cotxes de competició van començar a experimentar amb diversos dissenys i formes aerodinàmiques que ajudaven a augmentar considerablement aspectes com l'estabilitat dels vehicles, el pas per corba, la velocitat punta i l'acceleració en les rectes. Aquest va ser el punt de partida que va acabar donant pas a l'aparició d'elements com els alerons, *spoilers*, entrades d'aire, etc.

El primer aleró en un cotxe de competició va aparèixer l'any 1956 de la mà de l'enginyer suís Michael May. Aquest aleró era inclinable (entre -3° i $+17^\circ$) i anava muntat sobre el *cockpit* d'un Porsche Spyder, tot i això, els comissaris de les competicions com Nürburgring i Monza no en van permetre el seu ús i, per tant, mai va poder córrer de forma oficial.



Il·lustració 1: Porsche Spyder amb aleró (1956).

A principis de la dècada dels 60 els enginyers encarregats del disseny dels automòbils de competició van centrar els seus esforços en la reducció de la resistència al avanç mitjançant el disseny de carrosseries el més afilades possibles i reduint l'alçada dels vehicles per tal de disminuir la secció frontal i, per tant, la resistència que oferia l'aire a altes velocitats. Això va comportar dos variacions importants en el rendiment, la primera va ser que la disminució de la resistència al avanç va comportar un clar augment de les velocitats puntes en les rectes, no obstant això, les modificacions també van reduir el *downforce* del vehicle fent-lo més inestable i lent en el pas per corba.

Per tal de pal·liar els efectes negatius de disminuir la secció frontal del cotxe i, per tant, el *downforce*, van anar apareixent solucions aerodinàmiques com els *spoilers* que disminuïen notablement la sustentació positiva del cotxe.

La millora creixent del suport aerodinàmic (downforce) amb l'aparició dels *spoilers* i els alerons en el món de la competició va comportar una reducció notable dels temps per volta. Això va ser degut a que, tot i disminuir la velocitat punta en les *rectes*, es va aconseguir una millor acceleració degut a l'augment de la tracció i un increment notable de la velocitat en el pas per corba incrementant el rendiment del vehicle en el global del circuit.



Il·lustració 2: Ferrari 312 del 1968.

Arribats a aquest punt va ser quan els enginyers van començar a estudiar a fons com millorar la càrrega aerodinàmica dels vehicles per continuar millorant el seu rendiment.

Una de les solucions a les que es va arribar va ser la d'utilitzar el fenomen de la sustentació produïda per les ales dels avions però de forma inversa, aconseguint així alerons que literalment espenyien els cotxes contra terra augmentant de forma notable la tracció. El pioner en la utilització d'alerons invertits va ser el pilot Jim Hall quan en el 1966 va aparèixer a Bridgehampton amb un Chaparral 2E amb alerons en forma d'ala d'avió divertida.



Il·lustració 3: Chaparral 2E amb aleró, 1966.

Les millores aerodinàmiques i de rendiment que comportaven la col·locació d'aquests alerons va fer que la Fórmula 1, competició automobilística per excel·lència, adoptés ràpidament la idea i comencés a desenvolupar i millorar aquest element aerodinàmic.

Inicialment els alerons es muntaven sobre vares molt llargues i primes i això provocava que alguns es despreguessin de forma molt perillosa, ràpidament la comissió esportiva internacional en va regular el seu ús i disseny i en qüestió de pocs anys pràcticament tots el Fórmula 1 ja portaven muntat aquest element.

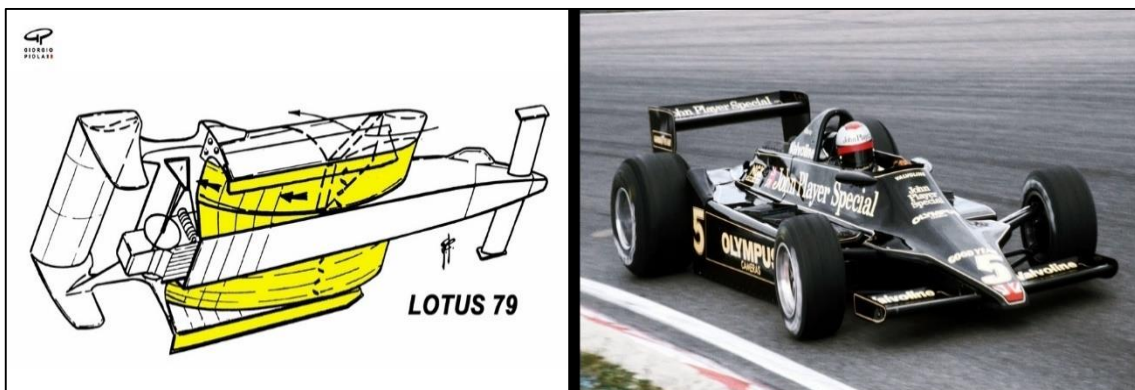
La seva utilització també es va traslladar a altres competicions com els ral·lis, on la majoria del cotxes de l'anomenat grup B van començar a muntar alerons molt voluminosos per tal de millorar el pas per corba en les condicions de poca tracció en les que corren.

Cal comentar que tant gran era la millora que aportaven el alerons que fins i tot es van començar a muntar elements semblants als alerons però de mida reduïda en alguns turismes esportius de carrer.



Il·lustració 4: '69 Datsun 240z, primer aleró en un cotxe de sèrie.

Durant pràcticament tota la dècada dels 70 no es van introduir nous elements que marquessin alguna gran diferència en el rendiment aerodinàmic dels vehicles fins que finalment, l'any 1978 l'enginyer Peter Wright que treballava a l'escuderia Lotus va introduir en la Formula 1 el primer fons pla que utilitzava el ja conegut "efecte terra" per tal de pegar, literalment, el cotxe a la carretera.



Il·lustració 5: Lotus '79, cotxe i esquema del fons pla.

Aquest nou element aerodinàmic creava una gran quantitat de succió sota el vehicle donant-li forma d'ala invertida a tota l'estructura del cotxe. Això es traduïa en uns nivells de càrrega aerodinàmica molt superiors als que hi havia en aquella època, i, per tant, un pas per corba molt més ràpid i una millora dràstica de la distància de frenat.

Tant gran va ser la millora que el Lotus '79 va ser el gran centre d'atenció i va permetre a Marco Andretti guanyar amb solvència el campionat de Formula 1. A partir d'aquest moment i fins l'actualitat el fons pla és i ha sigut un dels elements clau en el disseny aerodinàmic dels cotxes, tant de competició com de producció en sèrie i, és també, un dels elements que més s'ha estudiat i desenvolupat per tal de augmentar el rendiment.

L'últim gran element aerodinàmic no va començar a aparèixer en el món de la competició automobilística fins a finals dels anys 80, quan la necessitat de que l'aire que passava pel fons del vehicle sortís de la forma més fluïda possible per tal de reduir la resistència a l'avanç que es produïa a causa de les turbulències, va fer que els enginyers comencessin a utilitzar els anomenats difusors.

El difusor és un element aerodinàmic situat en la part inferior més retardada del vehicle i que, segons normativa, no pot començar abans de l'eix posterior del vehicle. El funcionament d'aquest element es basa en el principi de Bernoulli, que afirma que quan la velocitat d'un flux augmenta, la seva pressió disminueix. Així doncs, mitjançant el fons pla l'aire que passa per sota del cotxe s'accelera generant una forta depressió i, quan arriba al difusor, aquest extreu l'aire retornant-lo a nivells de velocitat i pressió propers a l'ambiental. Aquesta reducció de la velocitat del flux i el conseqüent augment de la pressió ajuda en l'extracció del flux d'aire de forma controlada per la part posterior del terra del vehicle evitant, així, les turbulències que es generen en l'estela dels automòbils i ajudant a que el flux d'aire passi de forma fluida i a alta velocitat per el fons pla del cotxe millorant dràsticament la funció d'aquest element.

Tenint en compte que un difusor en la F1 actual pot arribar a generar, juntament amb el fons pla, fins a un 40% de la càrrega aerodinàmica total del vehicle i que són els elements més importants en aquest aspecte, inclús més que els alerons, no es d'estranyar que sigui un dels elements més estudiats i limitats per el reglament.



Il·lustració 6: Baixos d'un Formula 1.

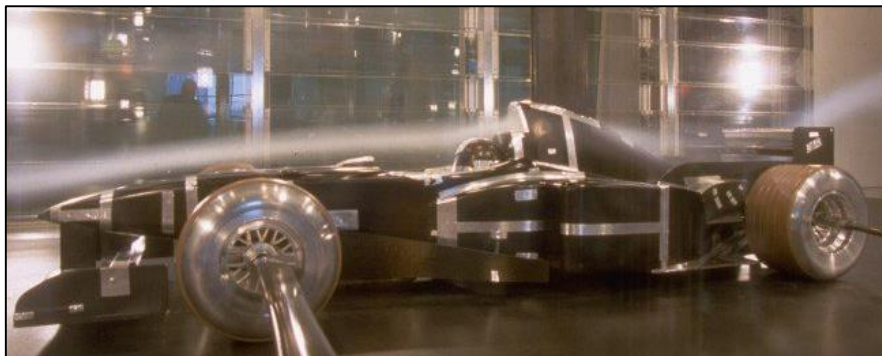
Un altre dels punts que fan del difusor un element aerodinàmic molt interessant i amb un gran protagonisme és que a diferència dels alerons, aquest gairebé no genera drag tot i ajudar a produir una gran càrrega aerodinàmica.

2.1.2. El túnel de vent

El túnel de vent és una de les eines d'investigació més utilitzades en els estudis aerodinàmics, ja que permet simular amb exactitud les condicions aerodinàmiques que experimentarà l'objecte a estudiar en una situació real. La funció principal d'aquest tipus d'instal·lacions és la de propulsar un fluid, ja sigui aire o gas, al voltant de l'objecte a estudiar a una velocitat semblant a la de funcionament real i amb un flux estable i paral·lel. D'aquesta forma és possible estudiar els fenòmens i moviments de l'aire al voltant de l'objecte i predir de forma molt exacta quin serà el comportament de l'automòbil.

Tot i que existeixen aparells que simulen condicions aerodinàmiques inventats a principis del s.XVIII, no va ser fins a finals del s.XIX i concretament, l'any 1871, que Francis Herbert Wenham i John Browning van dissenyar i construir el que seria el primer túnel de vent del món dedicat a l'estudi de l'aerodinàmica i del comportament del flux d'aire en l'aviació.

Ràpidament els enginyers que es dedicaven al camp de l'aeronàutica van veure que es podien extreure una quantitat immensa de dades tècniques sobre el comportament del flux d'aire a través de l'ús d'aquestes instal·lacions i van començar a desenvolupar aquest tipus d'instal·lacions a una gran velocitat.



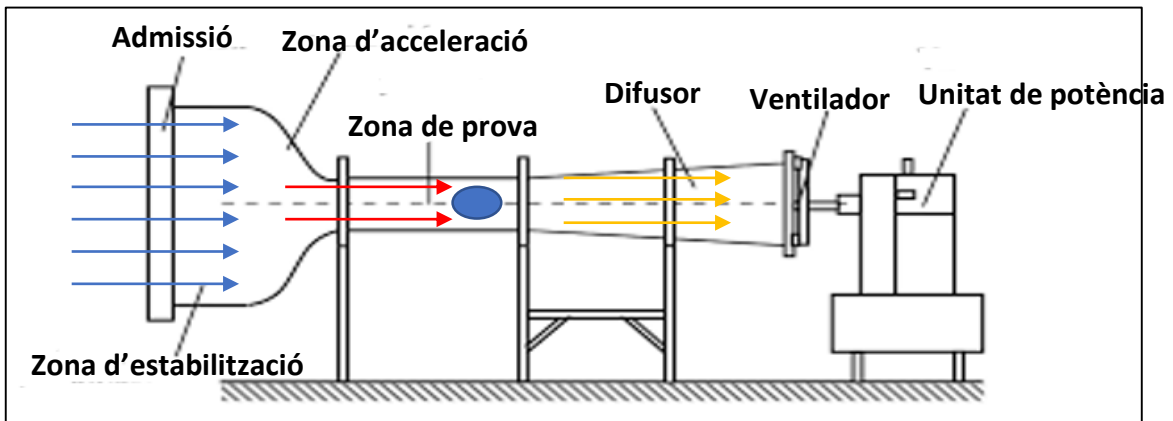
Il·lustració 7: Simulació del flux d'aire en el túnel de vent de Ferrari.

L'arribada del túnel de vent al camp de l'automoció, però, no va ser fins a la segona meitat del s.XX. Aquest retràs de pràcticament un segle en l'ús d'aquest tipus d'instal·lacions en el món de l'automoció respecte al món de l'aviació va ser degut a factors com la gran diferència en eficiència que hi ha entre un avió i un cotxe, la diferència en les velocitats d'operació o l'afecció de l'aerodinàmica en les condicions de funcionament d'ambdós tipus de vehicles.

Un cop introduït en el procés de disseny dels automòbils, aquestes instal·lacions van ajudar a desenvolupar ràpidament molts dels elements aerodinàmics que s'utilitzen actualment en el món de l'automoció com els spoilers, alerons, fons pla, difusors, etc.

Avui en dia aquesta instal·lació s'ha convertit en una part tant essencial del procés de disseny que la majoria dels fabricants d'automòbils actuals tenen les seves pròpies instal·lacions de prova.

A continuació es mostra una imatge amb algunes de les parts que componen un túnel de vent i la seva funció.



Il·lustració 8: Esquema d'un túnel de vent.

- **Admissió:** La zona d'admissió és per on entra l'aire al conducte principal del túnel. La seva funció és la d'evitar la desestabilització dels corrents d'aire i la formació i propagació de les turbulències degudes a canvis abruptes de la velocitat del vent.
- **Zona d'estabilització:** La zona d'estabilització és una part del túnel d'àrea constant en on es troben els correctors de flux i les reixetes estabilitzadores. La seva funció principal és la de permetre que el flux entrant pugui passar a la zona de contracció o acceleració de forma uniforme i lliure de turbulències.
- **Zona d'acceleració:** La zona d'acceleració o contracció, és una zona de disminució constant de l'àrea de pas del túnel. La seva funció és la d'accelerar el flux fins aconseguir la velocitat de disseny i disminuir les variacions de velocitat.
- **Zona de prova:** Com el seu nom indica, la zona de prova o secció de treball és la part del túnel on s'instal·la el model a estudiar i on es compta amb un flux uniforme, paral·lel i a la velocitat ideal de disseny.
- **Difusor:** El difusor és un element situat a continuació de la zona de prova que té la funció principal de disminuir la velocitat de sortida del flux gràcies a un increment de l'àrea de pas. Amb això s'aconsegueix augmentar gradualment la pressió alhora que es disminueix la velocitat del flux minimitzant, així, les pèrdues per fricció.

- **Ventilador:** És l'element encarregat de fer que l'aire passi a través del túnel. En funció de la velocitat de gir del ventilador es regula la velocitat del flux d'aire a través del túnel.
- **Unitat de potència:** És l'encarregada de fer girar el ventilador. En l'actualitat les unitats de potència instal·lades en els túnels de vent són motors que poden comptar amb mils de cavalls de força.

Cal comentar, també, que existeixen diversos tipus de túnels de vent i que aquests es poden classificar segons el seu tipus de configuració, el seu règim de treball o pel disseny de la seva secció de prova.

❖ Segons el tipus de configuració

- **Obert:** Configuració en la qual un ventilador succiona l'aire de l'exterior del túnel a través de tota la seva estructura interior per, finalment, acabar expulsant-lo de nou a l'exterior.
- **Tancat:** Configuració en la qual el ventilador accelera l'aire i el fa recircular a través de tota l'estructura interior.

❖ Segons el seu règim de treball

- **Subsònic:** Règim de treball en que la velocitat de l'aire en la zona de prova no supera la velocitat de $Mach < 0,7$.
- **Transsònic:** Règim en que la velocitat de l'aire es troba entre $0,7 < M < 1,2$.
- **Supersònic:** Règim en que la velocitat de l'aire es troba entre $1,2 < M < 5$.
- **Hipersònic:** Règim de treball en que la velocitat de l'aire en la zona de prova és major a $M > 5$.

❖ Segons el disseny de la seva secció de prova

- **Amb secció tancada:** La secció de prova és una continuació de la zona d'acceleració que compta amb parets de secció constant.
- **Amb secció oberta:** La zona d'assaig no està confinada entre parets, limitant així les discrepàncies que es poden ocasionar degut a la interacció de l'aire amb les parets.

2.2. Teoria de l'aerodinàmica

Com ja s'ha mencionat anteriorment, l'aerodinàmica és una branca de la física i, més concretament, una branca de la mecànica de fluids que s'encarrega d'estudiar el moviment relatiu de l'aire respecte a un cos en moviment i les seves interaccions.

Per tal d'entendre una mica més el comportament de l'aire en el seu contacte amb cossos en moviment i els efectes que aquest provoca, es fa necessari indagar una mica en alguns dels principis bàsics relacionats amb el comportament de l'aire i, per tant, amb l'aerodinàmica dels vehicles.

Alguns dels principis bàsics a tindre en compte alhora d'entendre els resultats de les simulacions aerodinàmiques són el principi de Bernoulli, el nombre de Reynolds, la capa límit, etc.

2.2.1. Principi de Bernoulli

El principi de Bernoulli, també conegut com a equació de Bernoulli, descriu el comportament d'un fluid qualsevol que es mou a través d'una línia de corrent. Aquest principi data de 1738 quan Daniel Bernoulli el va exposar en la seva obra Hidrodinàmica i explica que un fluid ideal (es menysté la viscositat i la fricció) que es mou a través d'un conducte tancat posseeix una energia constant i permanent al llarg del seu recorregut.

Per tal d'entendre i explicar millor l'equació cal puntualitzar que un fluid conté energia que consta de tres components:

- **Energia cinètica:** És l'energia que conté un fluid degut a la velocitat a la que es mou.
- **Energia Potencial gravitacional:** És l'energia que un fluid obté degut a l'altitud en la que es troba.
- **Energia de flux:** És l'energia que conté un fluid degut a la seva pressió.

La següent equació es la coneguda com a equació o trinomi de Bernoulli.

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P + \rho g z = \text{constant}$$

- V = velocitat del fluid en la secció.
- g = acceleració de la gravetat.
- z = altura geomètrica.
- P = pressió.
- ρ = densitat del fluid.

Com s'ha comentat amb anterioritat, i, per tal de poder aplicar el principi de Bernoulli s'han de suposar les següents condicions:

- La viscositat del fluid es menysprea.
- Es considera que el cabal es constant.
- Es considera que el fluid a estudiar és incompressible i, per tant, $\rho = \text{constant}$.
- L'equació s'aplica únicament al llarg d'una línia de corrent.

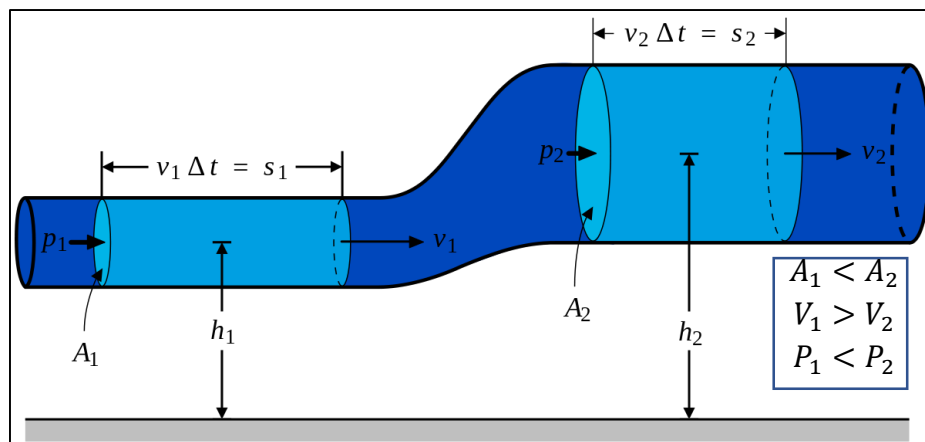
Per tant en un tub amb dos seccions diferents es pot considerar que:

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P_1 + \rho g z_1 = \frac{V_2^2 \rho}{2} + P_2 + \rho g z_2$$

- $\frac{V_1^2 \rho}{2} = \text{energia cinètica per unitat de volum}$
- $\rho g z = \text{energia potencial per unitat de volum}$

Es pot deduir de la següent condició de moviment d'un fluid que:

- La velocitat en la secció 1 és més elevada que la velocitat en la secció 2.
- L'àrea en la secció 1 és més petita que l'àrea en la secció 2.
- La pressió en la secció 1 és menor que la pressió en la secció 2.

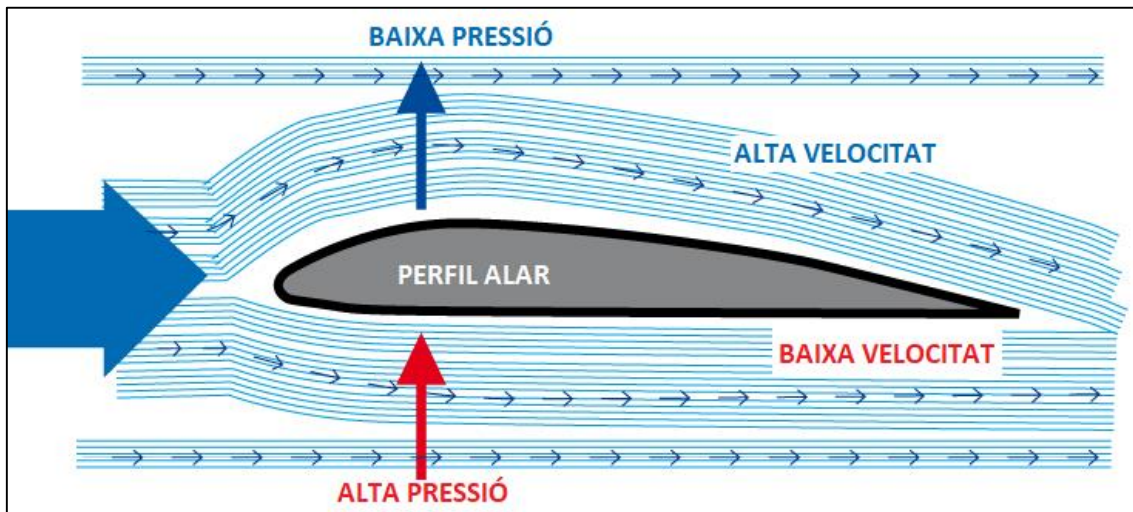


Il·lustració 9: Il·lustració del principi de Bernoulli.

La principal aplicació del trinomi de Bernoulli en l'aerodinàmica tant dels avions com dels automòbils la trobem en l'explicació i l'estudi de l'efecte de la sustentació que es produeix degut a la diferència de velocitats i, per conseqüència, de pressions que hi ha entre l'aire que passa per la part superior i la part inferior.

Aquest fenomen s'utilitza de forma inversa en avions i en automòbils, en els avions s'utilitza per generar una força vertical positiva que els permeti mantenir-se flotant en l'aire mentre que en els automòbils s'utilitza per intentar generar la major quantitat possible de càrrega aerodinàmica per tal de millorar l'estabilitat, la tracció i el pas per corba del vehicle.

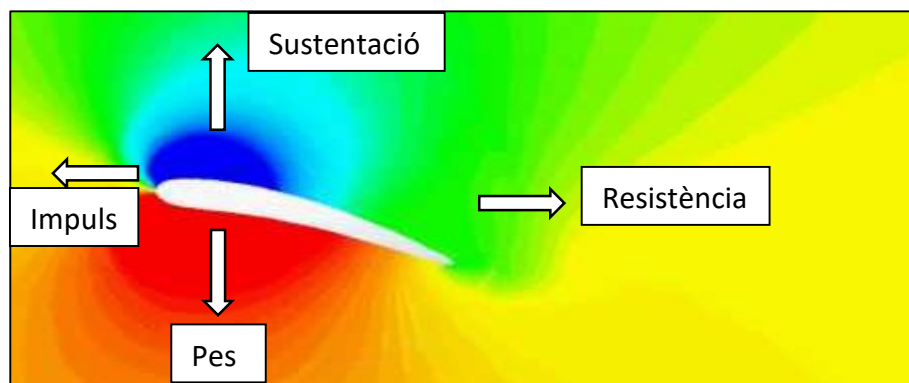
Per tal d'explicar la funció d'aquest fenomen en l'aerodinàmica i la sustentacions dels avions utilitzarem el següent perfil alar.



Il·lustració 10: Flux d'aire a través d'un ala.

Aquesta variació de la velocitat genera una diferència de pressions que fa aparèixer una força de sustentació molt elevada que permet a l'avió mantenir-se volant amb unes ales de mida reduïda en comparació amb el volum total del aparell sense cap tipus de problema.

A continuació es mostra una simulació de les pressions que es produeixen en l'aire al travessar un perfil d'ala d'avió.

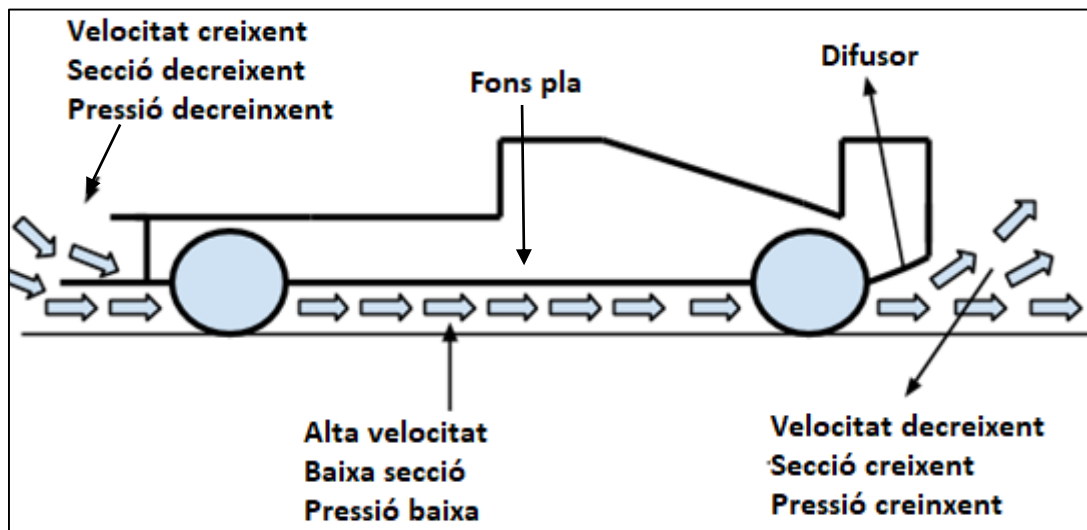


Il·lustració 11: Mapa de pressions de l'aire a través de l'ala d'un avió.

Un efecte igual a l'utilitzat en les ales dels avions però de sentit contrari, es a dir, per tal de generar una força cap avall, és el que s'utilitza en el món de l'automoció per tal de generar una gran càrrega aerodinàmica que permeti als vehicles millorar dràsticament part de les seves característiques que depenen de l'aerodinàmica com el seu pas per corba, l'estabilitat e inclús la tracció.

Alguns dels elements aerodinàmics en els que s'utilitza aquest teorema son els següents:

- ❖ **En els alerons:** Aquest fenomen s'utilitza en els alerons dotant-los d'un perfil exactament igual al de l'ala d'un avió però invers. Això produeix que l'aire que passa per la part inferior de l'aleró adapti una velocitat superior al de l'aire que passa per la part de sobre generant, així, una forta depressió que succiona el vehicle cap a terra.
- ❖ **En el fons pla:** En el cas del fons pla d'un vehicle s'utilitza la massa d'aire que entra en la secció que hi ha entre el fons del cotxe i el terra, aquest s'accelera molt degut a la forta disminució de l'àrea disponible generant, així, una depressió en el fons del cotxe que el succiona contra terra dotant-lo de molta càrrega aerodinàmica.
- ❖ **En el difusor:** En el cas del difusor s'aprofita la massa d'aire que arriba provinent del fons pla. Aquest aire arriba a una velocitat bastant elevada degut a la petita secció que hi ha entre el fons del cotxe i el terra i, en trobar-se l'augment lineal de la secció disponible que proporciona el difusor, disminueix molt la seva velocitat i alhora n'augmenta la seva pressió. Aquest fet proporciona a l'aire que surt per la part posterior del cotxe una pressió propera a la de l'aire ambiental disminuint així en gran part les pèrdues (drag) que produiria la sortida d'aire a baixa pressió.



Il·lustració 12: Propietats de l'aire en passar per la part inferior d'un F1.

2.2.2. Nombre de Reynolds

Establert l'any 1883 per Osborne Reynolds, el nombre de Reynolds és un coeficient adimensional utilitzat en la dinàmica de fluids que caracteritza el moviment d'un fluid relacionant la inèrcia i la viscositat d'aquest.

El nombre de Reynolds ve donat per la següent equació.

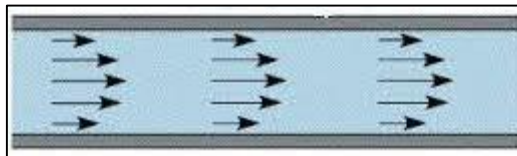
$$Re = \frac{D * v * \rho}{\mu}$$

- ρ = Densitat del fluid.
- v = velocitat del fluid.
- D = Diàmetre de la canonada.
- μ = Viscositat del fluid.

Aquest coeficient s'utilitza principalment per identificar si un flux és laminar o turbulent. D'aquesta manera es possible predir fins a un cert punt quin serà el comportament del fluid en moviment al voltant d'un cos així com algunes de les seves característiques o inclús les reaccions i les forces que aquest provocarà.

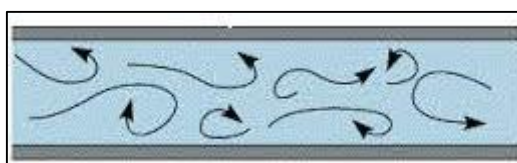
A continuació explicarem breument els dos tipus de flux que en nombre de Reynolds en permet diferenciar.

- **Flux laminar:** Amb un número de Reynolds inferior a 2300 aquest flux determina un moviment d'un fluid perfectament ordenat i suau, en que aquest es mou de forma paral·lela sense barrejar-se. Aquest tipus de flux és el més aerodinàmic i es dona principalment en fluids amb velocitats baixes i viscositats altes.



Il·lustració 13: Visualització d'un flux laminar

- **Flux turbulent:** Amb un número de Reynolds superior a 2300 aquest flux determina un moviment d'un fluid catastròfic en que les partícules es mouen de forma desordenada dificultant molt la possible previsió de la trajectòria d'aquestes. Les turbulències generades per aquest flux són una de les principals causes de drag en els vehicles.

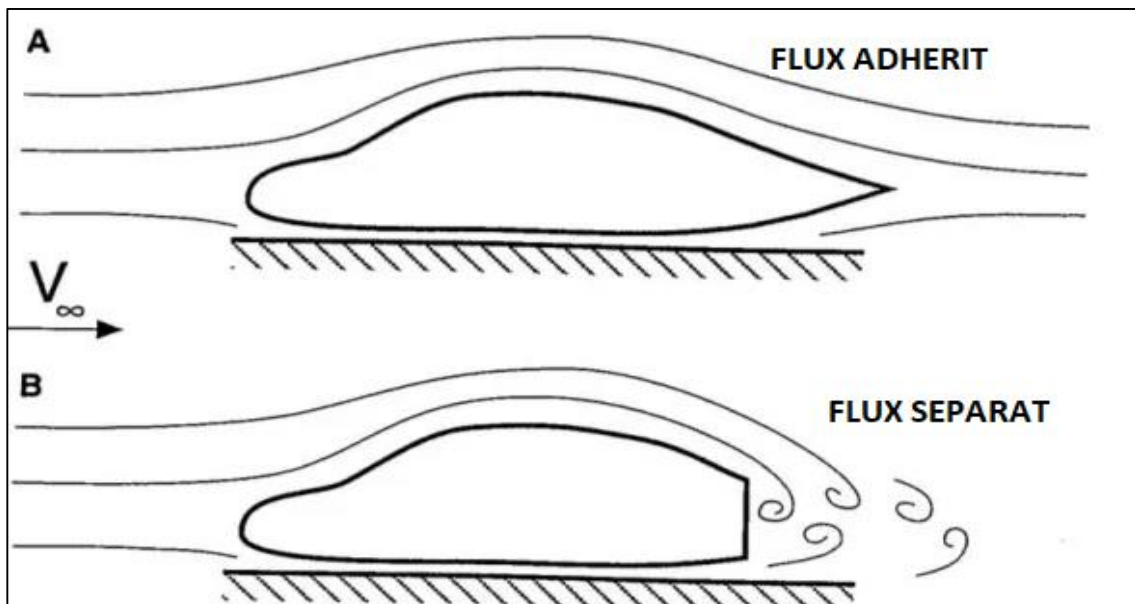


Il·lustració 14: Visualització d'un flux turbulent.

2.2.3. La capa límit

Per tal d'aplicar el punt anterior en l'estudi de l'aerodinàmica dels vehicles cal prestar especial atenció al comportament de l'aire en la zona més propera al cotxe. Aquesta zona de contacte de l'aire amb el vehicle s'anomena capa límit i és especialment important ja que és la zona on actuen les forces de fricció interna de l'aire, es a dir, és on actua la viscositat del fluid. Fora d'aquesta zona és pot estudiar l'aire depreciant la viscositat.

Per tal d'entendre la capa límit es fa necessari estudiar l'aire al voltant de la carrosseria del cotxe, en aquest punt tenim l'aire que flueix al voltant de l'automòbil seguint la forma de la carrosseria, el qual s'anomena flux adherit (Cas A), mentre que si el flux es desenganxa de la de carrosseria s'anomenarà flux separat (Cas B).



Il·lustració 15: Flux adherit i flux separat.

Com ja hem comentat anteriorment, fins ara havíem considerat l'aire com un gas ideal però, en realitat, l'aire és un fluid viscos i, com a tal, quan col·lisiona amb un altre cos en moviment l'aire en contacte amb la superfície del cos genera una força de fricció interna que altera el moviment i el comportament d'aquest fluid. Les partícules d'aire que estan en contacte amb la carrosseria del cotxe es frenen degut a la fricció fent que aquesta capa propera a la superfície disminueixi considerablement la seva velocitat. En el cas que les diferències de velocitats degudes a la fricció siguin petites, les línies de flux es desplaçaran paral·lelament creant una capa límit laminar. Si per el contrari existeix alguna pertorbació en la superfície que altera la direcció i la velocitat de les línies de flux, es generarà una capa límit turbulenta.

Degut a la reducció de velocitat a causa de la fricció de l'aire amb la superfície, es crea una acumulació d'aire que augmenta el gruix de la capa límit al llarg de la superfície del cos i, per tant, aquest fet pot fer que una superfície constant tingui una capa límit laminar a l'inici que es vagi transformant en turbulenta a mesura que avança.



Il·lustració 16: Evolució de la capa límit al llarg d'una superfície.

Cadascuna de les capes límit mencionades comporten una sèrie d'avantatges i inconvenients en el món de l'aerodinàmica de vehicles.

Una capa límit laminar ofereix una resistència molt petita disminuint de forma molt important el *drag*, mentre que una capa límit turbulenta presenta una fricció molt més elevada i, per tant, una resistència a l'avanç molt superior. No obstant això, el desprendiment de la capa límit en regim laminar es dona amb molta més facilitat que en el règim turbulent i això pot generar una sèrie de problemes aerodinàmics.

Degut a que l'adherència a la superfície de la capa límit en règim laminar es molt reduïda i això pot causar el desprendiment de la capa límit, la qual cosa pot resultar en una pèrdua de càrrega aerodinàmica sobtada, sovint l'opció més utilitzada és la de buscar una capa límit laminar que es vagi transformant en una capa turbulenta el més controlada possible per tal de retardar al màxim el desprendiment. En aquest punt entren en joc els generadors de vòrtex, els quals doten a la capa d'una certa turbulència que evita el seu desprendiment.



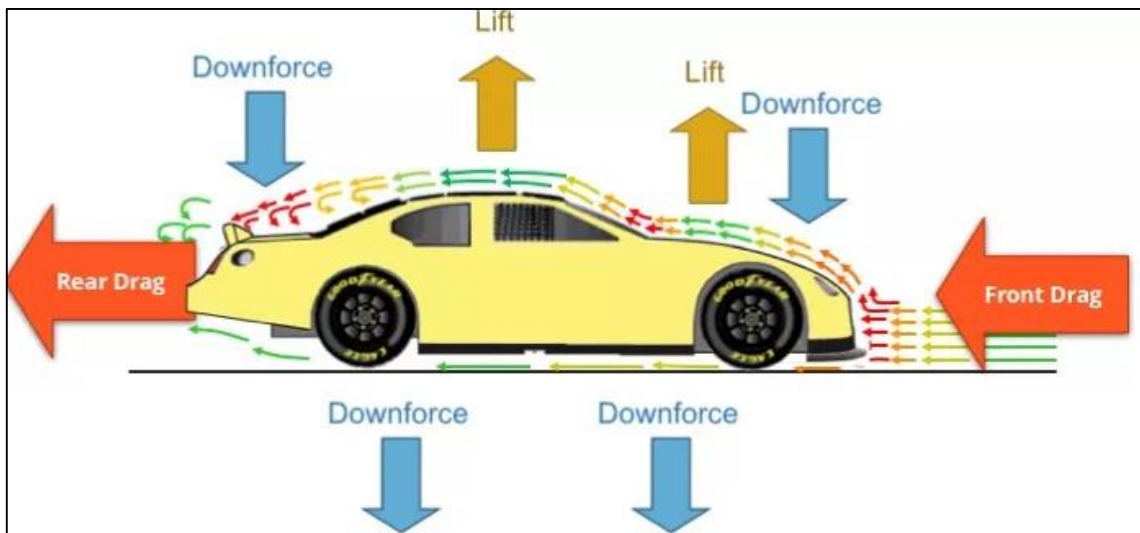
Il·lustració 17: Generadors de vòrtex en l'aleró d'un Fórmula 1.

2.3. Forces aerodinàmiques

Les forces aerodinàmiques ocasionades per el desplaçament de l'automòbil son de gran importància ja que afecten un gran nombre de factors de conducció i funcionament del vehicle com l'estabilitat, el control, la maniobrabilitat, la tracció, la velocitat punta, etc.

Quan hi ha un moviment relatiu entre l'aire o qualsevol altre gas sobre un cos, sorgeixen dues forces aerodinàmiques. La força normal es genera degut a la pressió de l'aire sobre la superfície del cos i actua normal a la superfície, mentre que la força de cisallament, causada per la viscositat del gas, actua paral·lelament a la superfície.

En el mon de l'aerodinàmica aplicada a vehicles, a la força normal se l'anomena força de sustentació, mentre que a la força de cisallament, la qual s'oposa al desplaçament del vehicle se l'anomena *drag*.



Il·lustració 18: Forces aerodinàmiques en un automòbil.

Cal comentar que usualment els elements aerodinàmics com poden ser els alerons, que generen una sustentació negativa "Downforce" per tal de millorar notablement algunes de les prestacions dels vehicles com l'estabilitat, la tracció, el pas per corba, etc. Produeixen, per contra, una resistència aerodinàmica a l'avanç "Drag" que disminueix la velocitat punta en les rectes. És per això que en la fase de desenvolupament d'un vehicle pren una importància vital trobar un punt d'equilibri entre un drag el més baix possible que ens permeti unes velocitats puntes altes i downforce elevat que asseguri una bona estabilitat en els trams revirats.

2.3.1. Resistència aerodinàmica “Drag”

El drag o resistència aerodinàmica és una força aerodinàmica que sorgeix del moviment relatiu d'un cos respecte a l'aire. Aquesta força és de sentit oposat a la velocitat del vehicle, es a dir, és la força que s'oposa al moviment.

El Drag està constituït per la fricció de la superfícies, la resistència artificial i la resistència induïda i l'equació que permet obtenir de forma genèrica el valor del drag és:

$$Drag = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot p \cdot V^2 \cdot S$$

On:

- p = Densitat del fluid.
- V = Velocitat.
- S = Superfície frontal projectada del vehicle.
- c_d = Coeficient aerodinàmic de resistència

2.3.2. Força de sustentació “Lift i Downforce”

La sustentació és una força generada sobre un cos que es mou a través d'un fluid, de direcció perpendicular a la de la velocitat. Aquesta força es pot produir en dos direccions, si és en direcció vertical positiva, es parla de lift, mentre que si es produeix en sentit vertical negatiu, s'anomena downforce.

En els vehicles de carrer s'acostuma a no tindre en compte la sustentació i fins i tot pot haver-hi un petit coeficient positiu degut a la forma dels vehicles. En els vehicles de competició, en canvi, passa tot el contrari, buscant una sustentació negativa amb l'objectiu d'obtenir un millor adherència o suport aerodinàmic.

L'equació que permet obtenir de forma genèrica el valor de la sustentació és:

$$Sustentació = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot p \cdot V^2 \cdot A$$

On:

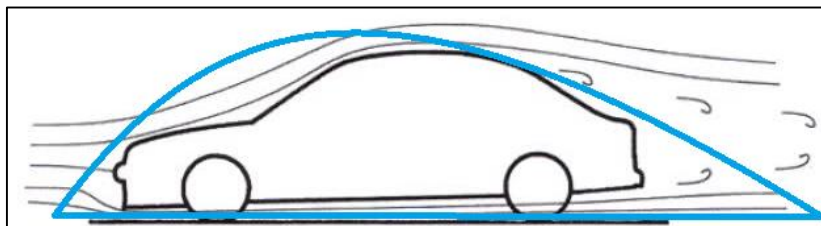
- p = Densitat del fluid.
- V = Velocitat.
- A = Superfície superior projectada del vehicle.
- c_L = Coeficient aerodinàmic de sustentació

3. ELEMENTS AERODINÀMICS

ELEMENTS AERODINÀMICS

Com hem vist en l'apartat **2.1-Història de l'aerodinàmica** no va ser fins als anys 60 quan es va començar a descobrir els beneficis de la càrrega aerodinàmica en els vehicles de competició. En aquell moment els equips, marques i enginyers que formaven part d'aquest món van començar a estudiar i desenvolupar a fons una sèrie d'elements amb la finalitat de millorar la càrrega aerodinàmica sense augmentar dràsticament el drag generat per tal de millorar el rendiment del vehicle.

Una de es causes que va portar al canvi de pensament respecte al suport aerodinàmic va ser que, degut al creixent augment de les velocitats puntes dels automòbils de competició a causa del desenvolupament constant dels motors va fer que els dissenys antics destinats a generar la menor resistència aerodinàmica possible comencessin a donar molts problemes degut a la sustentació positiva que generaven. Aquest problema feia que els cotxes fossin molt difícils de conduir degut a la poca estabilitat amb la que comptaven. Per tal de fer els cotxes més ràpid i alhora més manejables i segurs va començar a sorgir un interès en eliminar aquesta sustentació positiva que derivava del perfil general d'un cotxe, molt similar al perfil alar.



Il·lustració 19: Similitud entre el perfil d'un cotxe i el perfil alar.

En l'apartat ja mencionat també es van introduir els elements aerodinàmics més importants que s'han anat inventant al llarg dels anys per tal d'eliminar la sustentació positiva millorant, així, aspectes com l'estabilitat, la tracció, el pas per corba, etc., sense penalitzar greument la velocitat punta degut, en part, al constant increment tant de rendiment com de potència dels motors. Alguns dels elements aerodinàmics més importats que s'han introduït són el fons pla, els spoilers, els alerons, els difusors, etc. A continuació n'explicarem el seu funcionament i desenvolupament.



Il·lustració 20: Distribució aproximada de la càrrega aerodinàmica en un F1.

3.1. Els Spoilers

Per la seva senzillesa i per ser un dels apèndixs aerodinàmics introduïts inicialment en el món de la competició per tal de reduir la sustentació positiva dels automòbils, el primer element aerodinàmic que introduïrem i explicarem són els spoilers, ja siguin davanters, posteriors o divisors de flux (splitters).

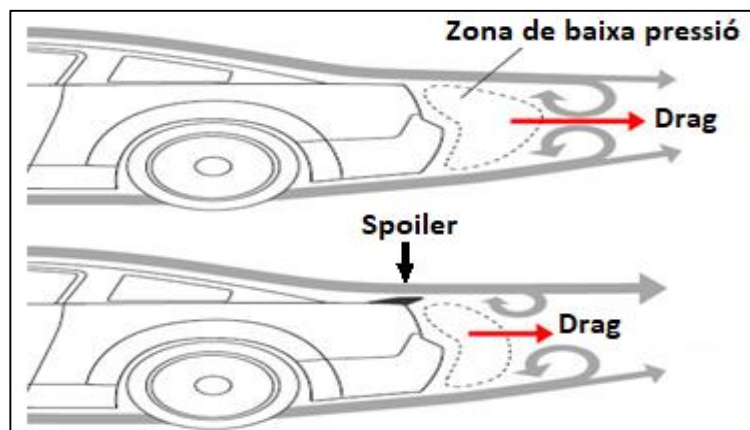
El spoiler és un dispositiu aerodinàmic que s'utilitza freqüentment en el món de la competició automobilística per tal d'interrompre o dirigir el flux d'aire que passa a través d'un vehicle en moviment. Una de les funcions principals és la de trencar la capa límit laminar produint turbulències per tal d'evitar el desprendiment.

3.1.1. Spoilers Posteriors

Els spoilers posteriors poden trobar-se en pràcticament totes les competicions automobilístiques, ja sigui en el DTM, la NASCAR, els ral·lis, etc., e inclús en molts models de cotxes de fabricació en sèrie, sobretot en models esportius. Aquests elements poden tindre moltes formes i mides diferents, però, a grans termes, un spoiler posterior és un apèndix aerodinàmic que allarga la superfície de la carrosseria.

El principal propòsit d'un spoiler posterior és el de pertorbar, interrompre o espatllar el flux d'aire que travessa la carrosseria del cotxe per tal d'intentar evitar o disminuir els efectes de la sustentació positiva que deriva de la depressió que es crea a causa de la velocitat de l'aire a través de la part superior del perfil d'un cotxe. Per tant, podem dir que el propòsit principal d'aquest apèndix aerodinàmic és pertorbar el flux d'aire produint una disminució de la velocitat en la part posterior del cotxe que derivarà en una millora del drag generat gràcies a reducció de les turbulències.

Un dels punts més positius d'aquest element aerodinàmic és que, tot i disminuir notablement la sustentació positiva derivada del perfil d'un automòbil, gairebé no genera un augment en la resistència aerodinàmica o drag.

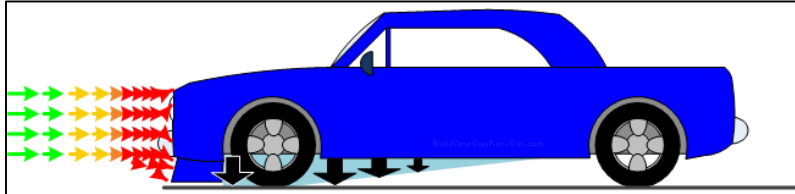


Il·lustració 21: Reducció del Drag amb la instal·lació d'un Spoiler posterior.

3.1.2. Spoilers Davaners

Els spoilers davaners també poden trobar-se en moltes competicions automobilístiques i el seu disseny i complexitat poden variar molt. Aquests poden anar des de uns senzills spoilers que siguin només una extensió plana de la part inferior de l'aleró davanter fins als spoilers integrats en les caixes d'aire dels cotxes tant de carrer com de competició.

Un spoiler davanter és, per tant, una extensió de la part inferior del para-xocs davanter que té com a finalitat principal la reducció de la secció entre el fons del vehicle i el terra.



Il·lustració 22: Esquematització del funcionament d'un spoiler davanter.

Aquest element proporciona dos beneficis principals. El primer és que la reducció de l'espai amb que compta l'aire per passar a través del fons del cotxe fa que una part de l'aire es desviï a través dels laterals de la carrosseria. Això es fa per tal de crear una depressió en la part frontal del fons del vehicle i també s'utilitza per evitar que passi molt aire a través del terra d'alguns vehicles que tenen un fons poc desenvolupat ja sigui perquè son cotxes de carrer o perquè les normes de la competició en limiten el disseny.

El segon benefici principal és que al reduir l'aire que passa per la part inferior del vehicle, també es possible reduir el drag degut a la interferència de les rodes amb el flux d'aire.

3.1.3. Divisors de flux

A diferència del spoiler explicat anteriorment, el divisor de flux o splitter, és una extensió horitzontal de llargada variable que s'utilitza per tal de crear una zona d'estancament de l'aire en la part frontal del vehicle que, degut a l'elevada pressió amb la que comptarà, espenyerà fortament el splitter cap a terra generant una gran quantitat de càrrega aerodinàmica sense produir pràcticament drag.

Cal mencionar que degut a l'eficàcia d'aquest element, en algunes competicions s'allarga la seva forma al voltat de pràcticament tota la carrosseria del cotxe.



Il·lustració 23: Divisor de flux frontal Mercedes DTM.

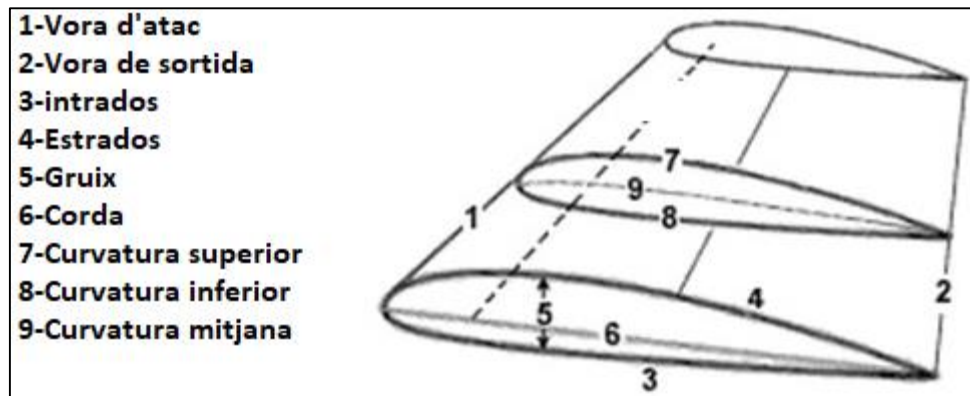
3.2. L'Aleró

El segon element aerodinàmic i el que és possiblement el més conegut és l'aleró. Des de la seva introducció al món de la competició no s'ha parat de desenvolupar aquest element millorant fortament les seves prestacions i introduint un gran nombre de variacions i formes que el fan un dels elements més versàtils.

Simplificadament un aleró és un element aerodinàmic que té la mateixa forma que l'ala d'un avió però de forma inversa i que s'utilitza per tal de crear una sustentació negativa o downforce.

3.2.1. Terminologia dels alerons

Tot i que les parts d'un aleró poden variar molt existeix una terminologia bastant comuna.

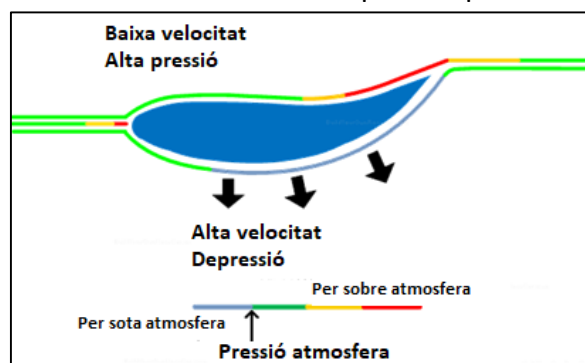


Il·lustració 24: Terminologia del perfil de l'ala d'un avió.

3.2.2. Funcionament

El funcionament de l'aleró d'un automòbil és exactament el mateix que el de les ales dels avions però en comptes d'utilitzar-los per generar sustentació positiva, s'inverteixen per generar downforce. D'aquesta forma i degut al perfil amb el que compten els alerons es genera una diferència de velocitat entre la part superior i la inferior de l'aleró.

Com ja es va comentar en el capítol 2.2 quan parlàvem del principi de Bernoulli, la major velocitat que agafa l'aire en la part inferior del perfil de l'aleró genera una depressió que succiona el vehicle cap a terra dotant-lo de molta càrrega aerodinàmica.



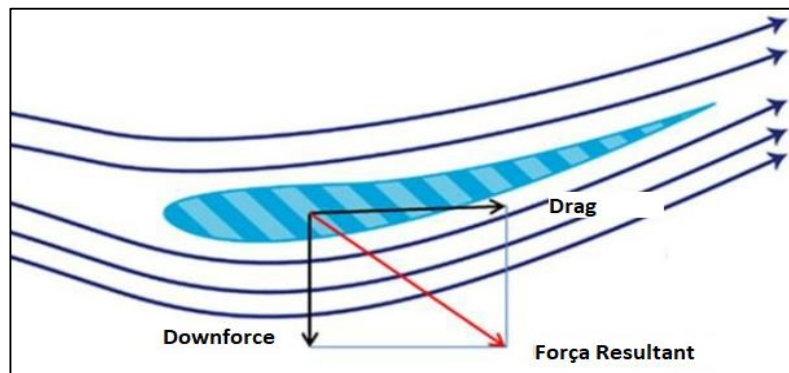
Il·lustració 25: Pressió al voltant d'un aleró.

3.2.3. Tipus de alerons

Tot i que es pot tipificar els alerons en funció de moltes variants, ja sigui càrrega, alçada, etc., degut a la gran diversitat d'aquests elements aerodinàmics que existeixen en l'actualitat, la forma més general de classificar-los és segons el nombre d'elements que els formen. D'aquesta manera a continuació farem una classificació dels tipus d'alerons segons tinguin un o dos elements. Cal destacar que tot i que aquests nombre d'elements son els més comuns també existeixen alerons de 3, 4 o inclús més elements.

❖ Alerons d'un element

Aquest tipus d'aleró consta d'un sol element (Il·lustració 26) i produeix càrrega aerodinàmica en funció del seu angle d'atac. El downforce generat augmenta com major sigui l'angle d'atac fins al punt on comença a produir-se una pèrdua de càrrega degut al desprendiment de la capa.

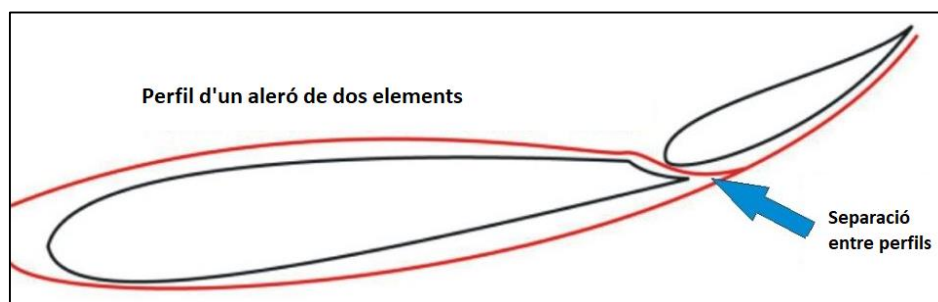


Il·lustració 26: Perfil d'un aleró d'un element.

❖ Alerons de dos elements

Aquest tipus d'aleró disminueixen notablement el desprendiment degut a la separació que existeix entre els dos perfils. Aquesta fet permet obtenir una major càrrega aerodinàmica que millori notablement el pas per corba, això si, en detriment de la reducció de la velocitat en les rectes a causa de l'augment del drag produït.

Aquest tipus d'alerons estan compostos majoritàriament per el cos principal i un flap (Il·lustració 27) augmentant així l'àrea i la curvatura total del aleró.



Il·lustració 27: Perfil d'un aleró de dos elements.

3.3. El fons pla

El tercer element aerodinàmic que explicarem i el que normalment produeix més càrrega aerodinàmica la majoria dels vehicles de competició, és l'anomenat fons pla.

Es pot dir que tots els cotxes, ja siguin de competició o de fabricació en sèrie, utilitzen l'efecte terra, això es degut a que la proximitat del fons del cotxe amb el terra interferirà significativament en el flux d'aire al voltant del vehicle, produint una sèrie d'efectes que tindran una gran importància en les prestacions generals. Cal tindre en compte que els efectes produïts no sempre són beneficiosos pel funcionament general del vehicle i que dependrà en gran part de factors com la naturalesa del vehicle o el disseny del fons pla. Per norma general un cotxe de carrer compta amb un fons amb molts elements al descobert com podrien ser el tub d'escapament, les suspensions, el càrter, etc. Aquests elements provoquen turbulències en el flux d'aire que fan disminuir la velocitat augmentant, com a conseqüència, la pressió en la part inferior del vehicle i augmentant en gran part, també, la sustentació positiva. Per tant es pot dir amb seguretat que per tal que l'efecte terra sigui beneficiós pel funcionament del vehicle cal dissenyar un fons pla que dirigeixi l'aire suaument i a alta velocitat a través del terra del vehicle.

3.3.1. Factors del disseny d'un fons pla

Com passa amb tots els elements aerodinàmics existents en el món automobilístic, existeix una gran variació de dissenys del fons pla d'un cotxe ja sigui en funció de l'ús principal del vehicle, de la complexitat del disseny o inclús de la permissivitat dels reglaments que regulen cada competició automobilística.

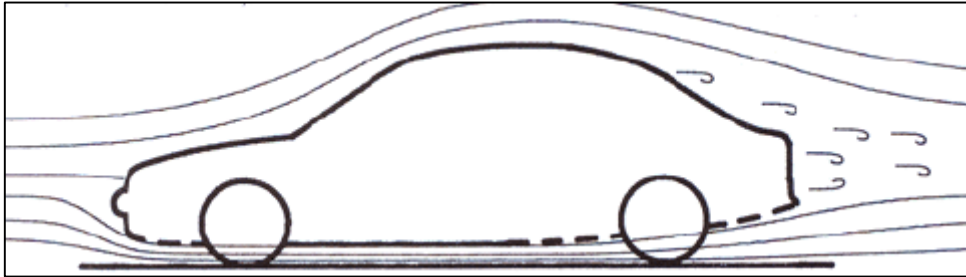
En el disseny d'un fons pla influeixen tres factors principals a considerar: l'altura del fons respecte al terra, la suavitat del terra i la forma d'aquest. És important recalcar que cadascun dels factors mencionats influeix directament en els altres dos factors alhora de dissenyar aquest element aerodinàmic.

En primer lloc la suavitat és un dels punts més importants alhora de dissenyar un fons pla ja les irregularitats pertorbaran el flux d'aire reduint la seva velocitat i generant una zona d'alta pressió. Mentre que un fons llis permetrà a l'aire desplaçar-se a alta velocitat creant una zona de depressió que augmentarà dràsticament el downforce.



Il·lustració 28: Comparació del fons pla d'un F1 amb un cotxe de carrer.

El segon punt a tindre en compte es la forma del panell inferior o fons pla. El flux d'aire que passa a través d'aquest element aerodinàmic es pot optimitzar donant una mica de curvatura per tal que l'aire s'acceleri al llarg del fons del cotxe evitant zones d'alta pressió que es puguin crear i millorant, per tant, el downforce general del cotxe.



Il·lustració 29: Inclinator del fons pla d'un cotxe.

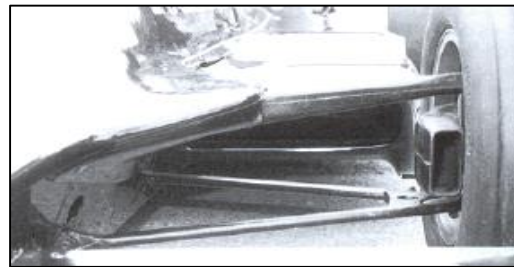
L'últim factor a tindre en compte alhora de dissenyar el fons pla d'un vehicle és l'alçada d'aquest respecte a l'asfalt. La teoria ens diu que com menys distància hi hagi entre el fons del cotxe i el terra, major serà la contribució de l'efecte Venturi i, per tant, major serà la sustentació negativa que aquest element produeixi. No obstant això, en moltes categories automobilístiques hi ha una alçada mínima reglamentària per tal d'evitar que els cotxes perdin sobtadament càrrega aerodinàmica degut a les irregularitats del terra.

3.3.2. Elements addicionals del fons pla

Per tal d'optimitzar el funcionament del fons pla, existeixen una sèrie d'elements que ajuden a millorar la càrrega aerodinàmica que aquest genera. Alguns d'aquests elements son el difusor (el qual explicarem en la següent secció), els túnels, els generadors de vòrtex, etc.

❖ Els túnels

Els túnels emprats en el mon de la competició s'utilitzaven per dirigir més aire a la part inferior del cotxe augmentant encara més la velocitat del flux i, per tant, la depressió que genera aquest element aerodinàmic.



Il·lustració 30: Túnel d'aire del Lotus del '79.

❖ Generadors de vòrtex i canalitzadors de flux

Els generadors de vòrtex i els canalitzadors son un altres elements que s'utilitzen per optimitzar el funcionament de l'efecte terra en el fons pla. El seu propòsit principal es el d'evitar el desprendiment de la capa límit en el cas dels generadors de vòrtexs i el de conduir el flux en el cas dels canalitzadors.

3.4. El difusor

El difusor i, més concretament, el difusor posterior, el qual es col·loca al final del fons pla és l'últim dels elements aerodinàmics que introduïrem. La funció principal d'aquest element aerodinàmic és la d'incrementar progressivament la superfície disponible entre el terra i el fons del cotxe per tal de generar una sèrie de canvis en el flux d'aire.

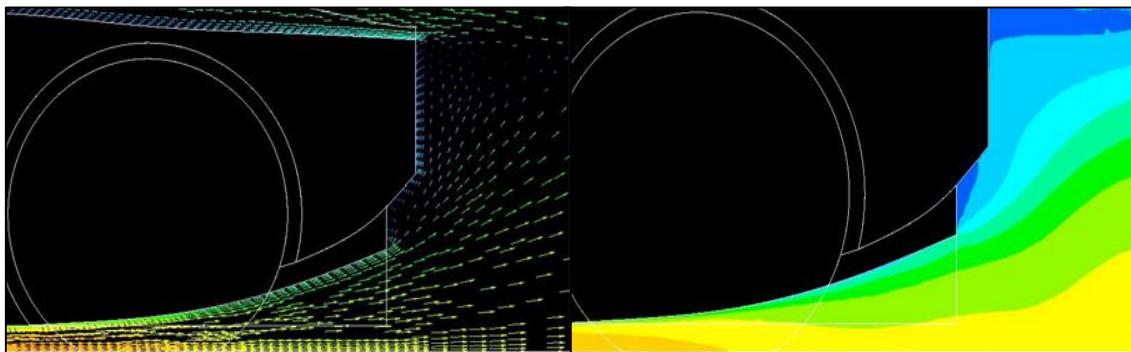
Així doncs, el difusor es l'element que “obra” la part posterior del fons pla i la connecta progressivament amb la zona de baixa pressió que es genera a l'estela del cotxe.

3.4.1. Funcionament del difusor

Tot i que el funcionament del difusor es bastant simple, aquest es un dels elements més complicats de dissenyar correctament. Com ja hem mencionat, aquest component obra la secció amb la que compta l'aire produint així una sèrie d'efectes com l'augment de la depressió i, per tant, el downforce que genera el fons o la disminució del drag que es produeix en la zona posterior degut a la generació de turbulències fent que es millori, així, el rendiment del fons pla i el del cotxe en general.

L'augment de la depressió en la zona del fons pla del cotxe s'aconsegueix gracies a que el difusor evita d'una banda les turbulències que es generen quan l'aire surt del fons de forma descontrolada i, d'altra banda, ajuda a que la capa límit no arribi al terra evitant així que es generi una capa turbulenta que obstrueixi el pas d'aire. Es pot dir que el difusor ajuda a aconseguir un flux més estable i paral·lel.

L'altre punt que fa del difusor un element clau per optimitzar el funcionament del fons pla és la velocitat de l'aire a la sortida posterior del vehicle. L'augment de secció amb la que compta l'aire provoca una disminució de la seva velocitat ajudant així a que aquest retorni progressivament als valors de l'aire ambiental. Aquest fet redueix dràsticament les turbulències que es generen a la zona posterior de qualsevol vehicle ajudant a reduir de forma molt important el drag que es genera en aquest punt.



Il·lustració 31: Reducció de la velocitat del flux en un difusor.

Il·lustració 32: Reducció de la pressió del flux en un difusor.

4. EL DTM

EL DMT

L'objectiu principal d'aquest treball és la comparació aerodinàmica d'un cotxe del món de la competició, amb totes les millores amb les que comptes, respecte al mateix model de fabricació en sèrie. Per tal de fer això possible hi havia dues competicions automobilístiques que em cridaven fortament l'atenció, els ral·lis i el DTM. A continuació explicaré algun dels punts que em cridaven l'atenció de cadascuna d'aquestes modalitats i que m'han portat a decantar-me finalment

❖ Els ral·lis

Els ral·lis són una competició automobilística que es disputa en trams de carretera i de camí que estan normalment oberts al públic, es a dir, carreteres i camins comuns que no estan adaptats a les curses com els circuits. Com moltes altres disciplines automobilístiques, compten amb una reglamentació pròpia que en dictamina les normatives.

A grans trets es pot dir que hi ha quatre grans diferències que separen als ral·lis de les altres competicions disputades en circuits. En primer lloc i, com ja he comentat, es disputen en vies públiques convenientment tancades al trànsit. En segon lloc i, la que més em cridava l'atenció alhora de fer una possible comparació aerodinàmica adequada, és que el tipus de vehicles utilitzats han de ser aptes per a circular per carreteres públiques i, per tant, són cotxes de producció en sèrie modificats especialment per la competició que han de poder estar matriculats i dotats dels mateixos elements obligatoris que la resta de cotxes. La tercera diferència és que els equips que competeixen en els ral·lis estan formats per un pilot i un copilot. La quarta i última diferència important és que mentre en les competicions disputades en circuits tots els participants prenen la sortida a la vegada, en els ral·lis ho fan d'un en un amb un temps d'un minut entre ells.

❖ El DTM (*Deutsche Tourenwagen Masters*)

Inicialment anomenada *Deutsche Tourenwagen Meisterschaft* és una de les competicions automobilístiques de velocitat més importants del món i es disputa des de l'any 1984 fins l'actualitat a excepció dels anys '97 '98 i '99.

Els automòbils que participen en aquesta competició són models similars als de fabricació en sèrie amb una sèrie de modificacions aerodinàmiques, estructurals i mecàniques que els permeten arribar a velocitats molt properes als 300km/h de punta. Aquestes altes velocitats juntament amb la importància de la càrrega aerodinàmica que hi ha en aquesta competició van ser els seus punts que finalment van fer que em decantés per realitzar el disseny i la simulació d'un dels models de cotxe del DTM.

4.1. Introducció al DTM

Tal i com ja s'ha comentat, el DTM o *Deutsche Tourenwagen Masters* és una de les competicions automobilístiques internacionals de velocitat més importants del món juntament amb altres grans competicions com la Fórmula 1 o la NASCAR Cup Series. Aquesta competició s'organitza anualment des de fa molts anys gràcies a la cooperació de institucions com la Internationales Tourenwagen-Rennen e.V. i la Federació Alemanya d'Automobilisme y Motociclisme.

Els cotxes que prenen part en aquest campionat són models de turismes que comparteixen nom i forma amb els seus parents de producció en sèrie, tot i que tant la mecànica, l'estructura com l'aerodinàmica són completament modificades per tal de dotar-los de les capacitats aerodinàmiques i de potència necessàries per a la competició.

Aquest tipus de vehicles poden arribar als 300km/s en algunes de les rectes més llargues i alhora compten amb una gran quantitat de càrrega aerodinàmica o Downforce que els permeten traçar les corbes a gran velocitat.

Per tal d'entendre la importància d'una competició que actualment compta amb 18 pilots, alguns de molt renom provinents de la F1, 3 grans fabricants alemanys com BMW, Audi i Mercedes-AMG, fins a 10 curses anuals en circuits mítics com Hockenheim o Nürburgring i més de 31 llargs anys de trajectòria automobilística, es fa necessari donar un cop d'ull a la història d'aquesta categoria des de la seva creació fins a l'actualitat.



Il·lustració 33: Audi RS5, cotxe campió de l'edició 2017 del DTM.

4.2. Història i evolució

Amb 31 edicions disputades el DTM s'ha convertit en una de les grans competicions mundials de l'automobilisme, des de els seus inicis aquesta important competició ha passat per dues grans etapes, la compresa entre els anys 1984-1996 en la qual la competició s'anomenava *Deutsche Tourenwagen Meisterschaft* i l'actual DTM (Deutsche Tourenwagen Masters) que s'organitza des de l'any 2000.

Durant tota la seva trajectòria aquesta competició ha disputat un total de 473 curses en 34 anys d'història, ha comptat amb 410 pilots de 45 nacionalitat diferents i ha tingut 22 campions diferents i fins a 76 pilots que han guanyat com a mínim una cursa.

4.2.1. Deutsche Tourenwagen Meisterschaft (1984-1996)

Antecessor de l'actual DTM, el Deutsche Tourenwagen Meisterschaft va ser una competició automobilística de turismes originalment disputada a Alemanya, tot i que més endavant va expandir-se a la resta d'Europa i del mon. En els seus inicis el DTM es disputava amb automòbils d'equips privats i sota la normativa de la FIA però l'èxit i l'expectació que va generar a alemanya va fer que a finals dels anys 80 començessin a interessar-se constructors oficials com Mercedes Benz, Opel, BMW, Audi o Alfa Romeo.

El declivi del Deutsche Tourenwagen Meisterschaft va ser precisament el seu èxit. L'any 1993 la categoria va adaptar un nou reglament i va convertir-se en la segona competició mundial tant en tecnologia com en pressupost solament per sota de la Fórmula 1. Aquesta creixent ambició i l'exponencial increment dels costos així com dels preus de les entrades i dels drets televisius va fer que alguns dels constructors comencessin a deixar la competició fins que l'any 1997 es va haver d'anular l'edició degut a que únicament quedava Mercedes Benz com a constructor.

4.2.2. Deutsche Tourenwagen Masters (2000-Actualitat)

Tot i el col·lapse inicial el DTM, la competició havia servit no només per fomentar l'automobilisme a Alemanya sinó també com a font d'èxit monetari per a les marques. Això va fer que responsables de Mercedes-Benz, Opel i Audi es reunissin els anys 1998 i 1999 per reorganitzar i reviure al DTM, amb l'objectiu d'aconseguir una categoria de vanguardia, competitiva, però amb costos raonables per poder invertir.

El DTM de l'era moderna va començar a disputar-se el 2000, posicionant-se com la sèrie més important a nivell mundial d'automòbils de turisme. Opel es va retirar després de 2005, deixant la categoria amb solament dues marques fins el retorn de BMW l'any 2012. En l'actualitat aquesta competició continua comptant amb solament els 3 constructors anomenats.

5. DISSENY DEL TURISME DE SERIE

DISSENY DEL TURISME DE SERIE

Arribats a aquest punt comença la part pràctica del projecte que consistirà en primera instància en el disseny i simulació d'un turisme de fabricació en sèrie i posteriorment en el disseny i acoblament d'una sèrie d'elements aerodinàmics basats en els turismes del DTM que milloraran la càrrega aerodinàmica i, per tant, les prestacions que el cotxe tindria en un circuit. Finalment acabarem fent una comparació del flux, les pressions, etc. al voltant dels dos models per intentar entendre en quina magnitud aquests elements milloren les prestacions dels vehicles.

5.1. Elecció del turisme de sèrie

Així doncs la primera feina ha estat l'elecció del model de carrer que dissenyarem i simularem. És evident que havia de ser un model de vehicle que tingués estigues present en el DTM i en model de producció en sèrie. Per tant, havia de ser un model d'un dels tres constructors presents en el DTM actual, Mercedes Benz, BMW o Audi.

Després de fer una mica de recerca el model final escollit ha estat el BMW M6 Coupe. Com que qualsevol dels models hauria estat vàlid, he basat l'elecció en el gust personal.



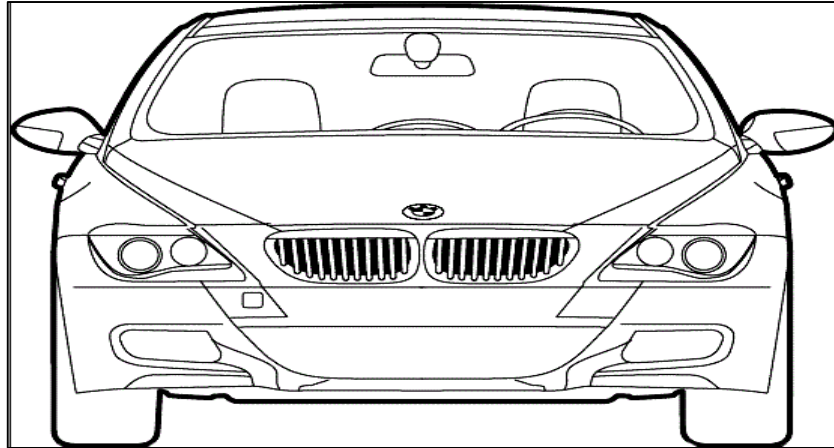
Il·lustració 34: BMW M6 GT3 DTM.



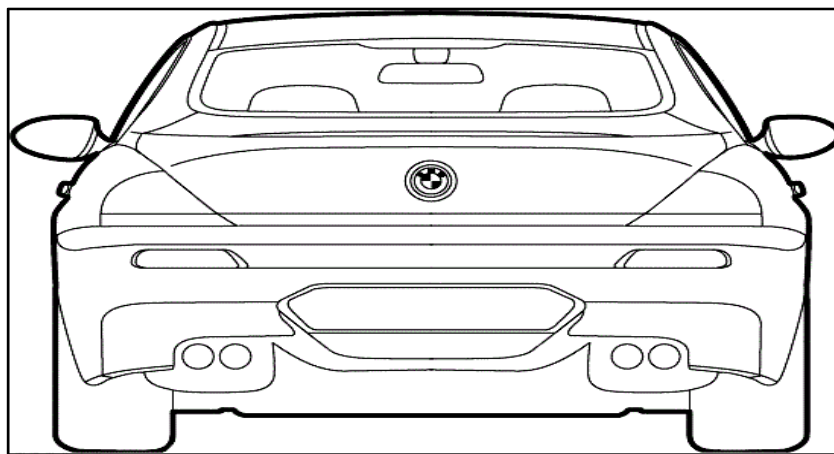
Il·lustració 35: BMW M6 Grand Coupe.

5.2. Disseny 3D del turisme de sèrie

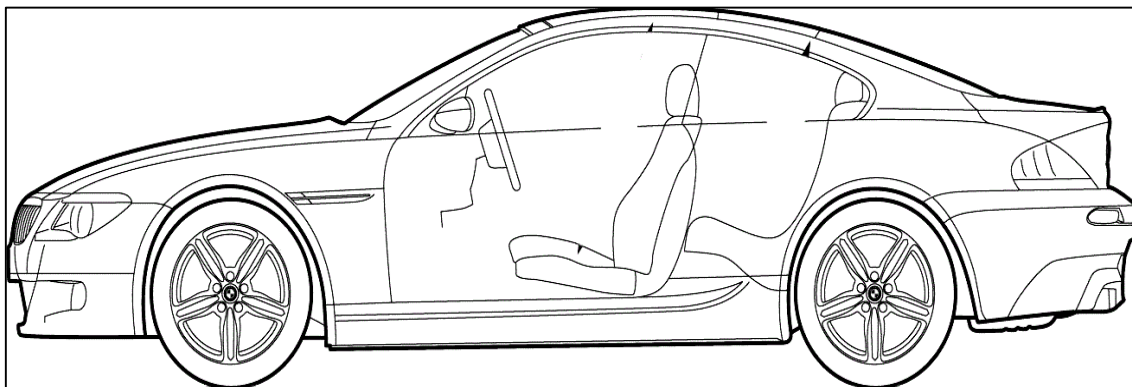
Per tal de produir un model CAD d'un vehicle ja dissenyat és imprescindible comptar amb uns esbossos del alçat de la part davantera i posterior, la planta i el perfil per tal de poder traçar les línies i simular acuradament les formes i les mides del vehicle. A continuació es mostren els esbossos més acurats i detallats que vaig trobar i en els quals es basa tot el model CAD del BMW M6.



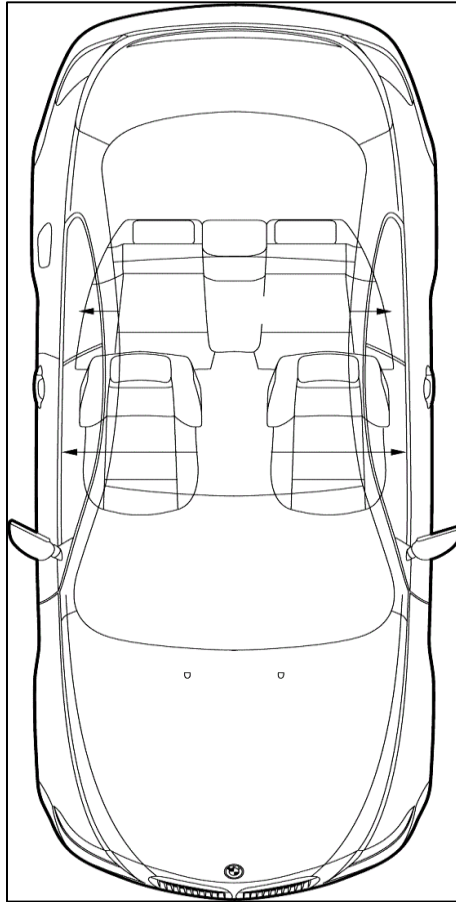
Il·lustració 38: Vista frontal BMW M6 Grand Coupe.



Il·lustració 37: Vista posterior BMW M6 Grand Coupe.

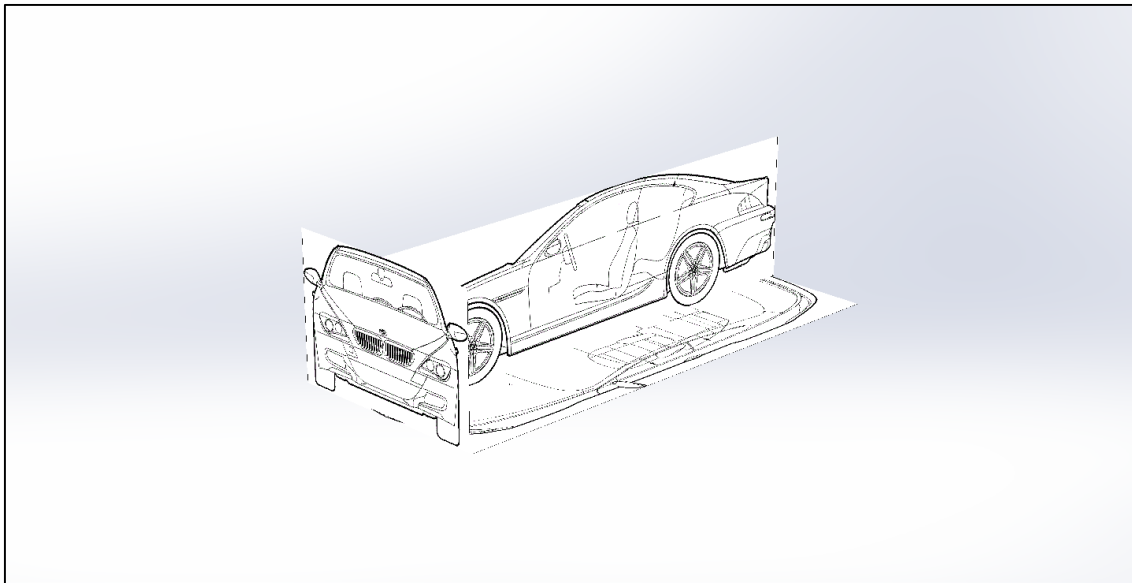


Il·lustració 36: Vista lateral BMW M6 Grand Coupe.



Il·lustració 39: Vista superior BMW M6 Grand Coupe.

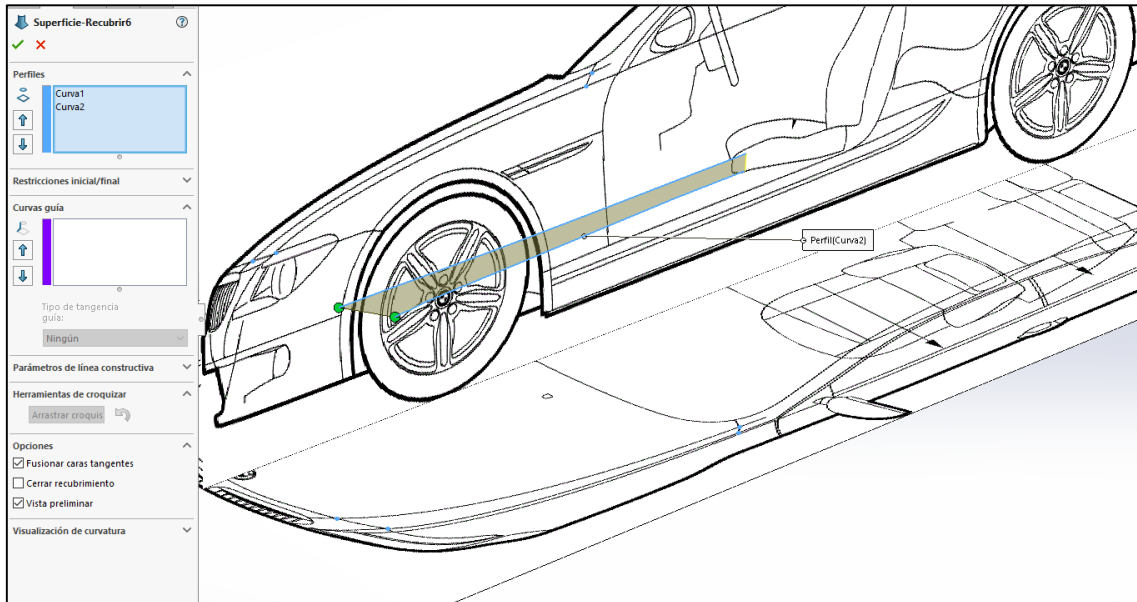
Un cop trobades les vistes detallades necessàries era hora de fer un croquis amb els esbossos en posició i procedir amb el disseny del model de producció en sèrie a través del mòdul de superfícies del programa SolidWorks.



Il·lustració 40: Esbossos del BMW M6 col·locats en posició.

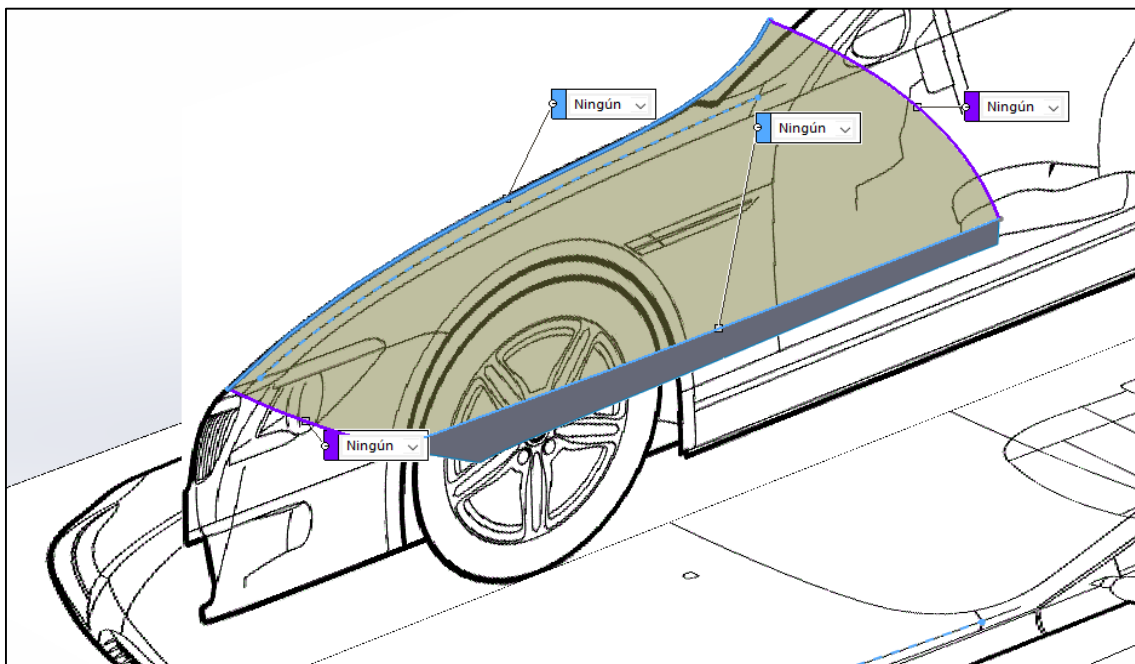
5.2.1. Disseny de les superfícies

Un cop col·locats els croquis amb els esbossos en posició s'ha procedit a la creació de les superfícies que componen el cotxe. Això s'ha fet mitjançant projeccions de corbes i plànols 3D intentant en tot moment obtenir una superfície el més semblant possible al model del cotxe en qüestió.



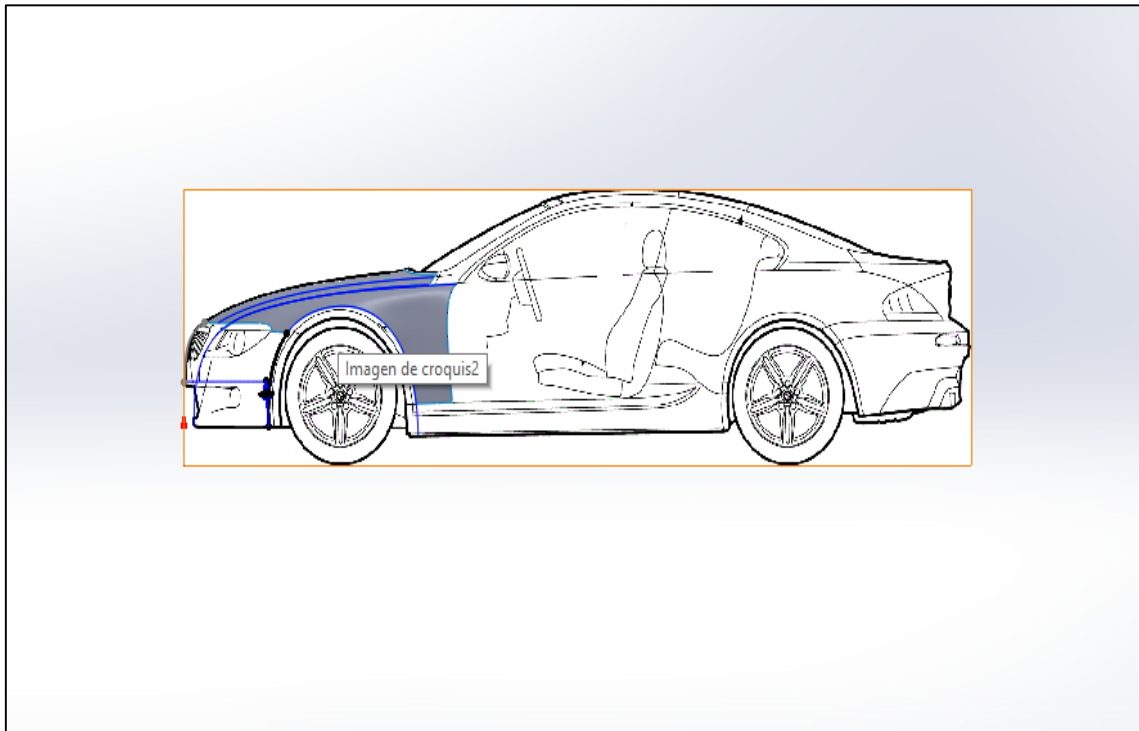
Il·lustració 41: Creació de les superfícies del model CAD – 1 (línia projectada).

Un cop creada la primera superfície tridimensional s'ha decidit continuar amb el capó i el morro per tal de construir el model començant per la part frontal i anar avançant progressivament cap a la posterior.



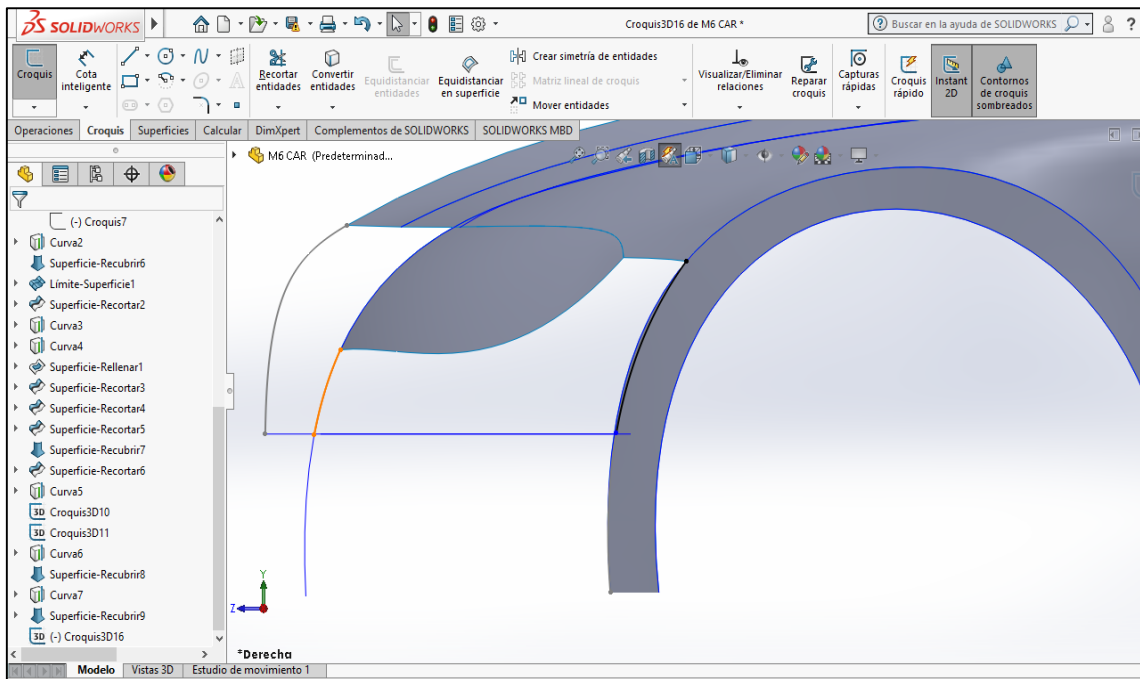
Il·lustració 42: Creació de les superfícies del model CAD – 2 (capó).

Abans de construir les superfícies de la part frontal del cotxe s'ha hagut de fer la part lateral-frontal, també nomenada aleta lateral per tal de donar l'amplada ideal al model.

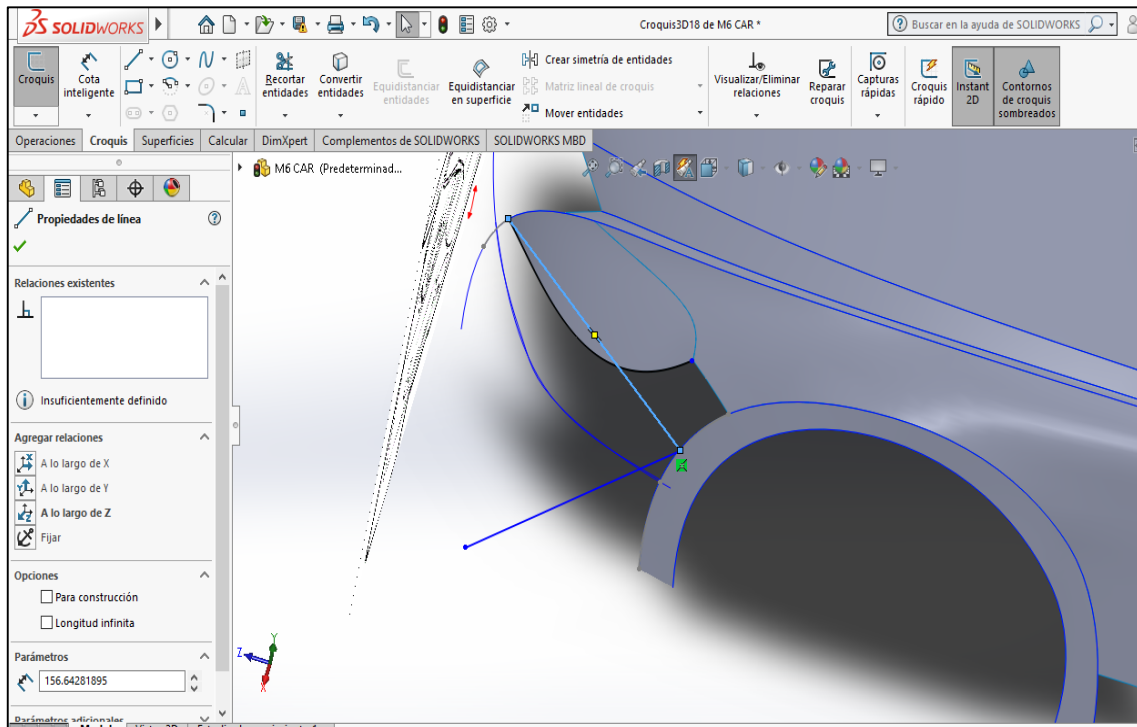


Il·lustració 43: Creació de les superfícies del model CAD – 3 (aleta lateral).

Tot seguit s'ha realitzat la superfície del far davant així com de les corbes projectades necessàries per a la posterior creació de les superfícies del morro.

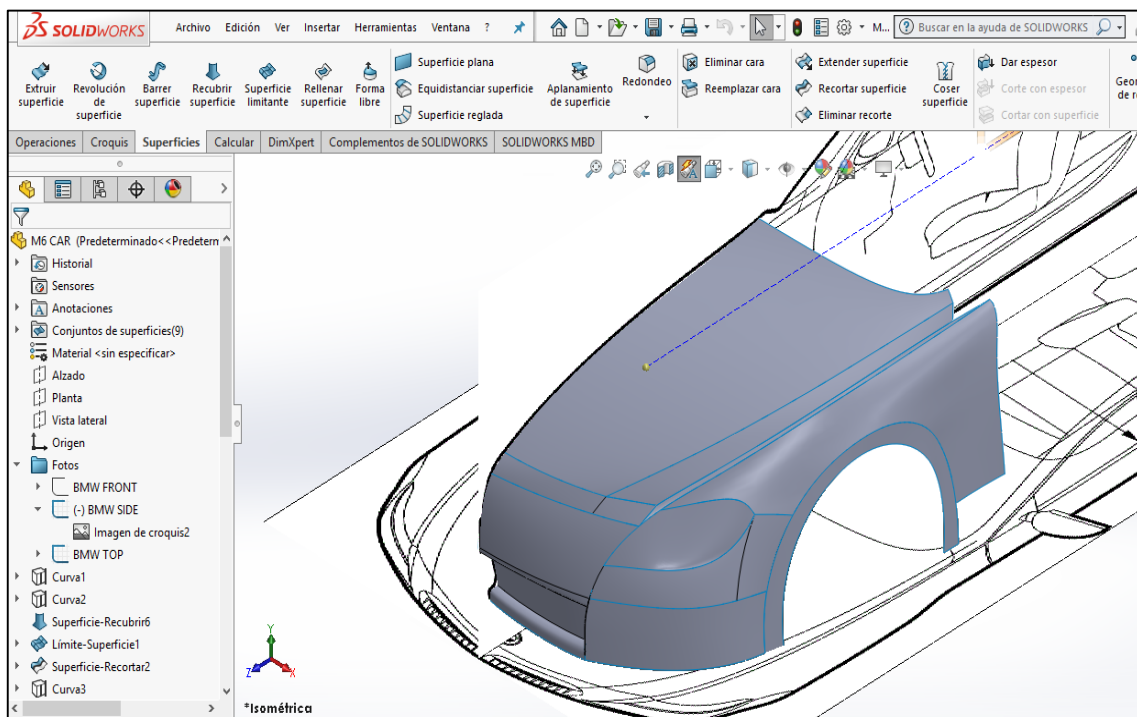


Il·lustració 43: Creació de les superfícies del model CAD – 4 (far).



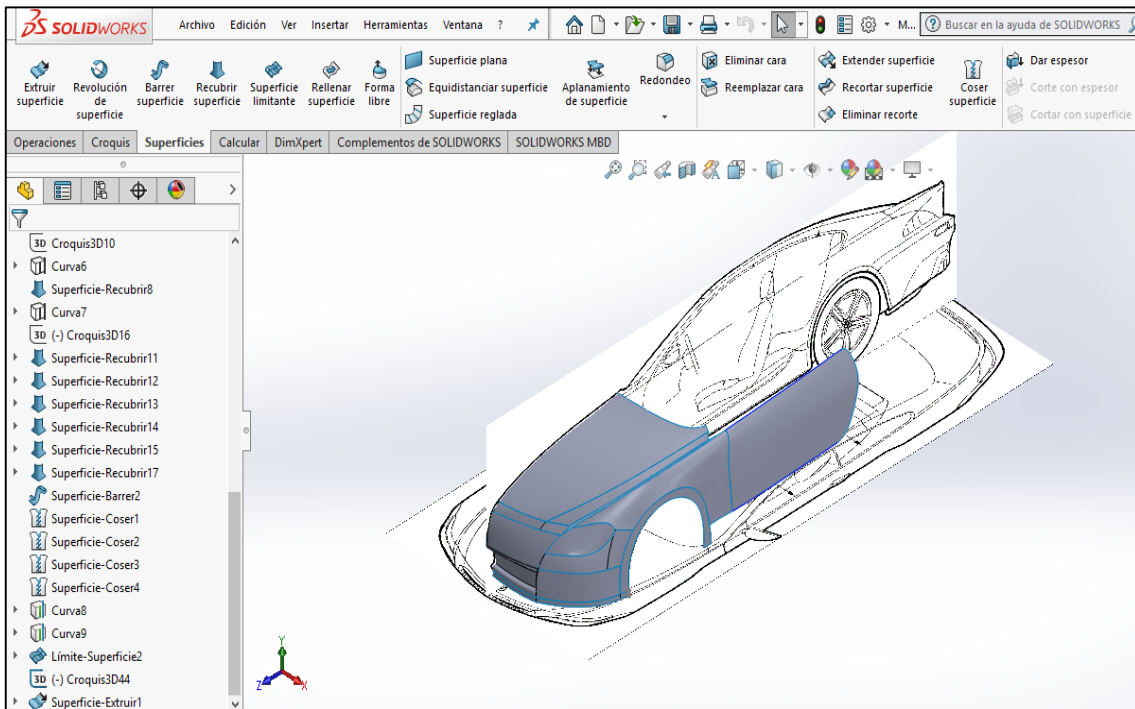
Il·lustració 44: Creació de les superfícies del model CAD – 5.

Un cop fetes totes les corbes projectades i els plànols en 3D necessaris s'ha procedit a omplir les superfícies que componen tota la part frontal del vehicle.



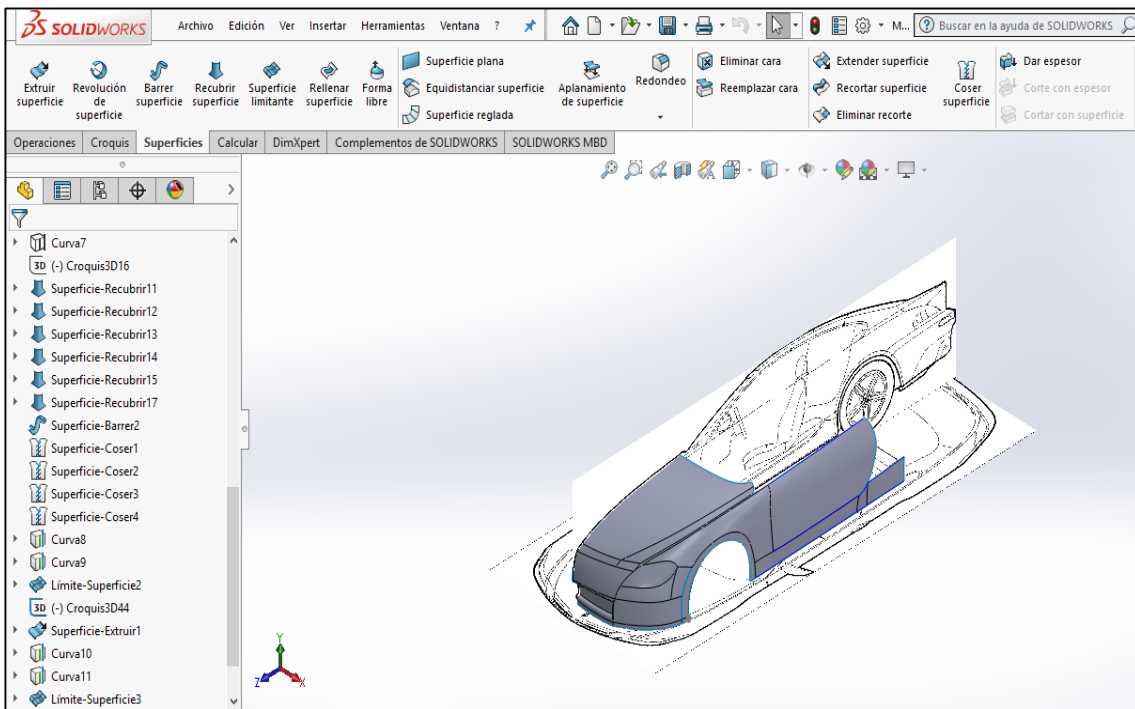
Il·lustració 45: Creació de les superfícies del model CAD – 6 (frontal).

Un cop finalitzat el morro arriba l'hora de continuar amb el lateral del cotxe. En primera instància es procedeix amb la creació de la única porta del cotxe, ja que al ser un model coupé, només compta amb 3 portes.



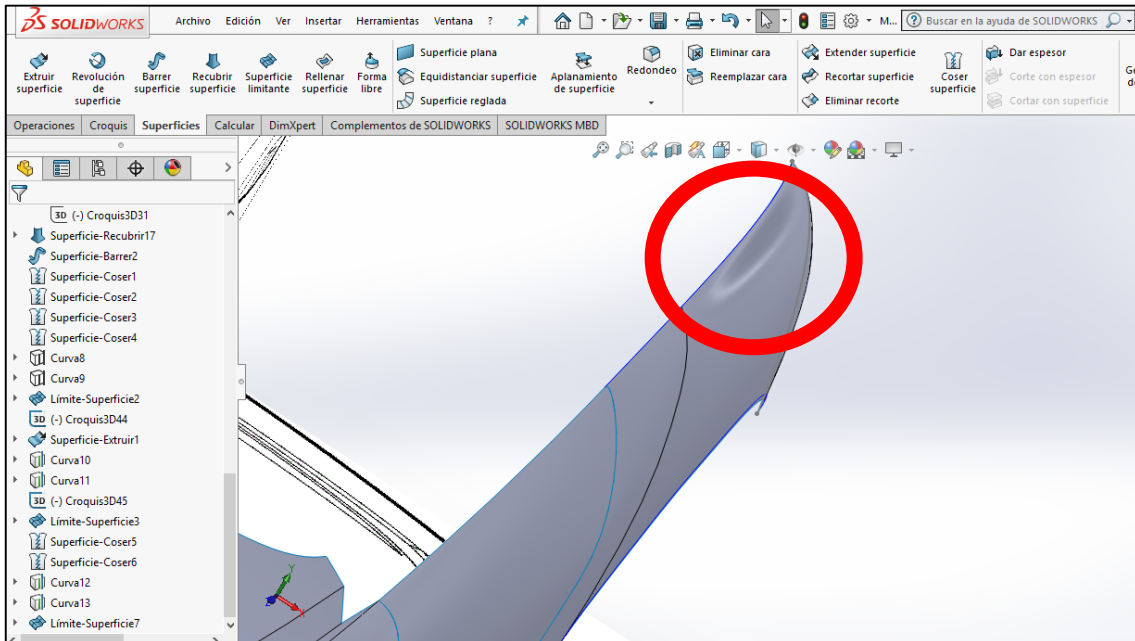
Il·lustració 46: Creació de les superfícies del model CAD – 7 (porta).

El següent element a dissenyar és el faldó lateral, un cop realitzat aquesta superfície ja només quedaria l'aleta posterior per acabar pràcticament tota la superfície lateral.



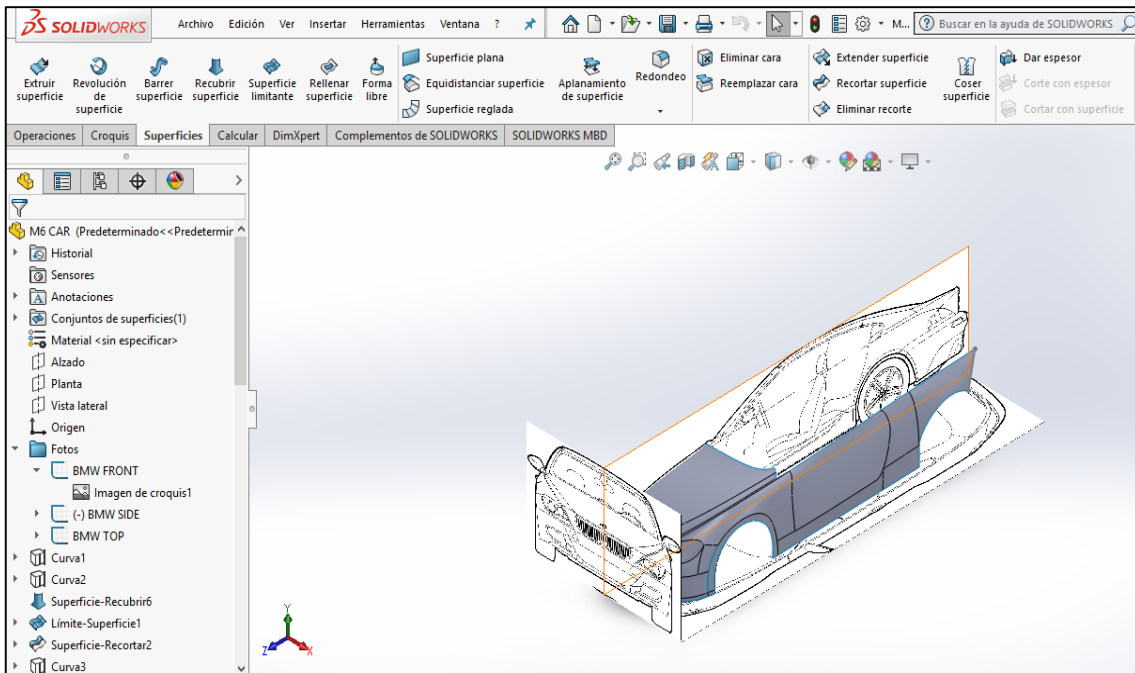
Il·lustració 47: Creació de les superfícies del model CAD – 8 (faldó).

A continuació i, abans de continuar amb el disseny del cotxe, es mostra un dels molts problemes que han anat sorgint alhora de produir les superfícies. La majoria d'aquests problemes han estat degut a errors en les profunditats, en els croquis 3D, en les corbes guia, etc. A mesura que anava avançant el disseny i amb la creixent experiència que anava guanyant, cada cop em sorgien menys problemes relacionats i/o errors.

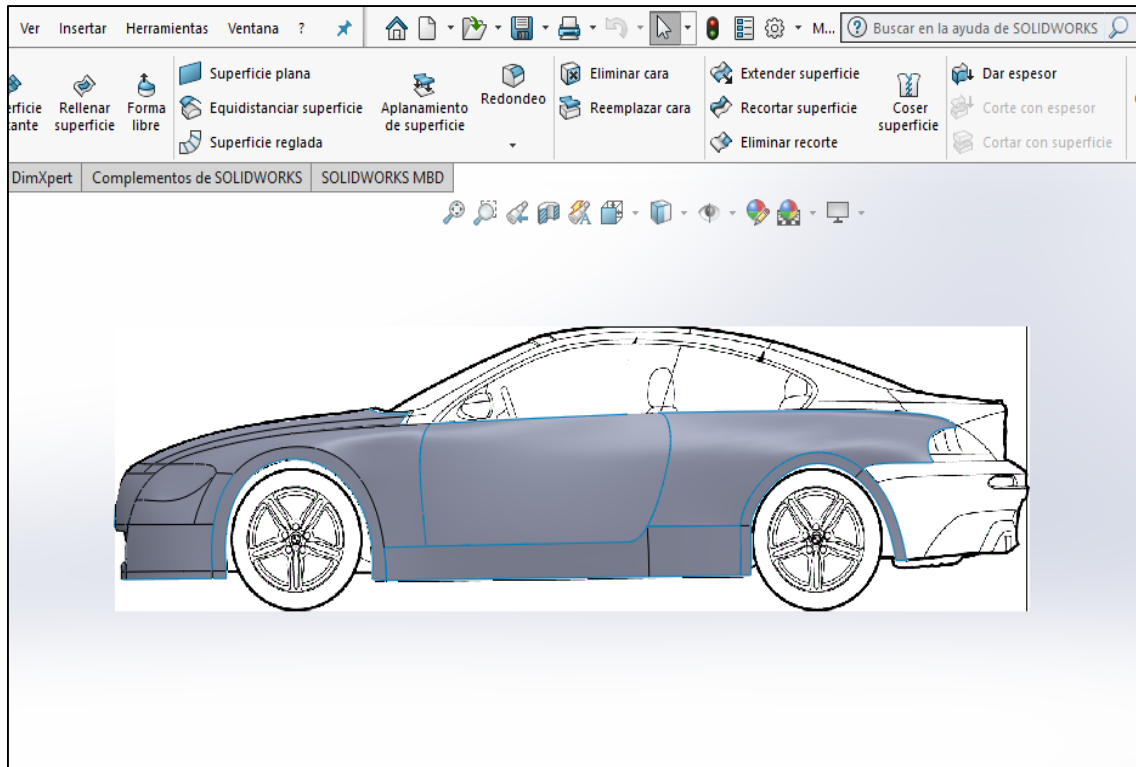


Il·lustració 48: Creació de les superfícies del model CAD – 9 (error).

Un cop corregit l'error que va sorgir en la creació de l'aleta posterior ja tenia pràcticament acabat el lateral del BMW M6, a falta de la secció que envolta la roda.

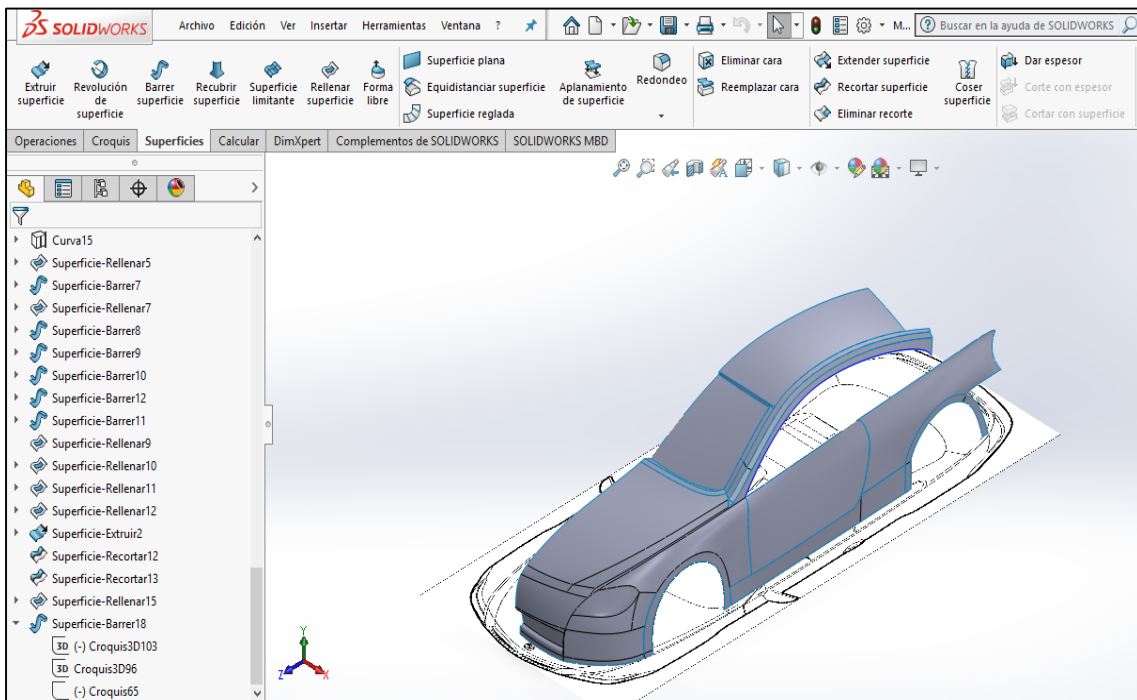


Il·lustració 49: Creació de les superfícies del model CAD – 10 (aleta posterior).



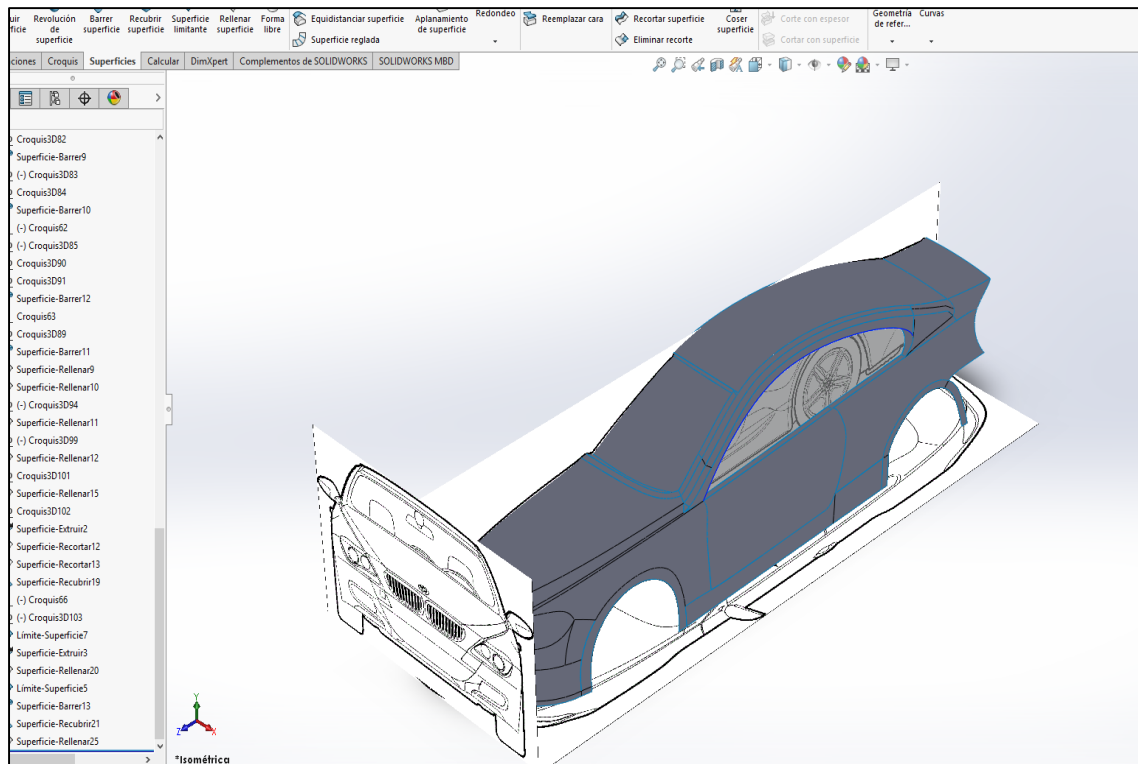
Il·lustració 51: Creació de les superfícies del model CAD – 11 (lateral).

Un cop finalitzat el lateral del cotxe, s'ha decidit continuar amb la part superior del vehicle abans d'acabar amb la part posterior. Així doncs, els següents elements creats han sigut el vidre davanter i tot seguit el sostre.



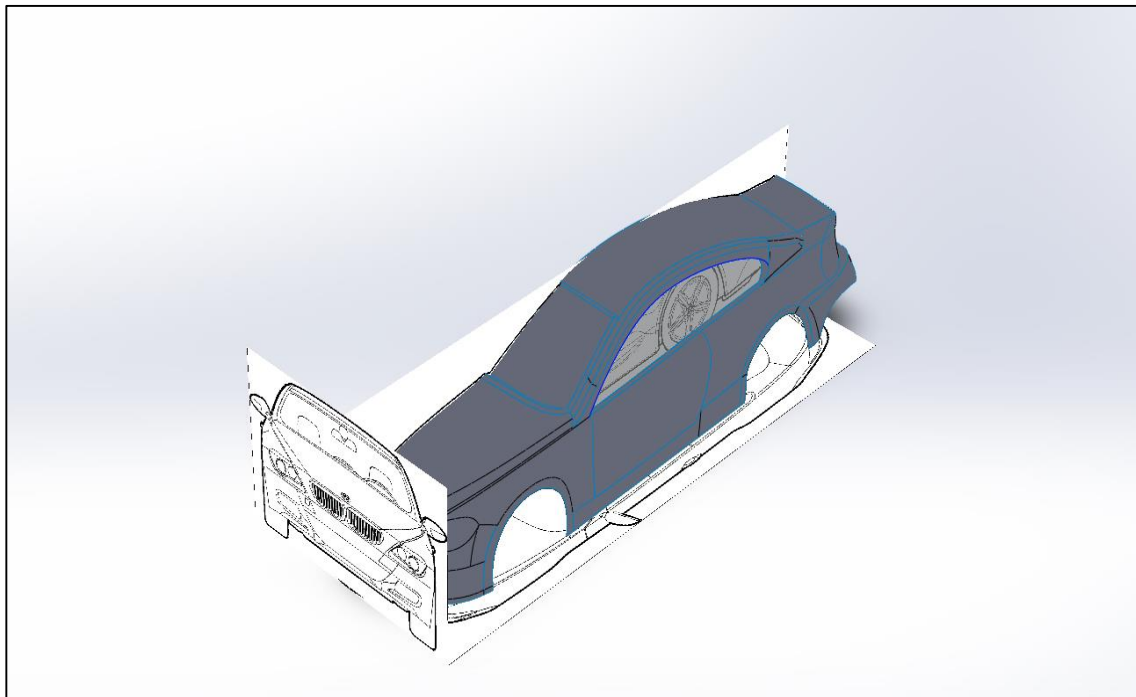
Il·lustració 50: Creació de les superfícies del model CAD – 12 (sostre).

Per acabar la tota la part superior s'ha procedit a la creació del vidre posterior, la tapa del maleter i, finalment, els vidres de les finestretes dels passatgers.



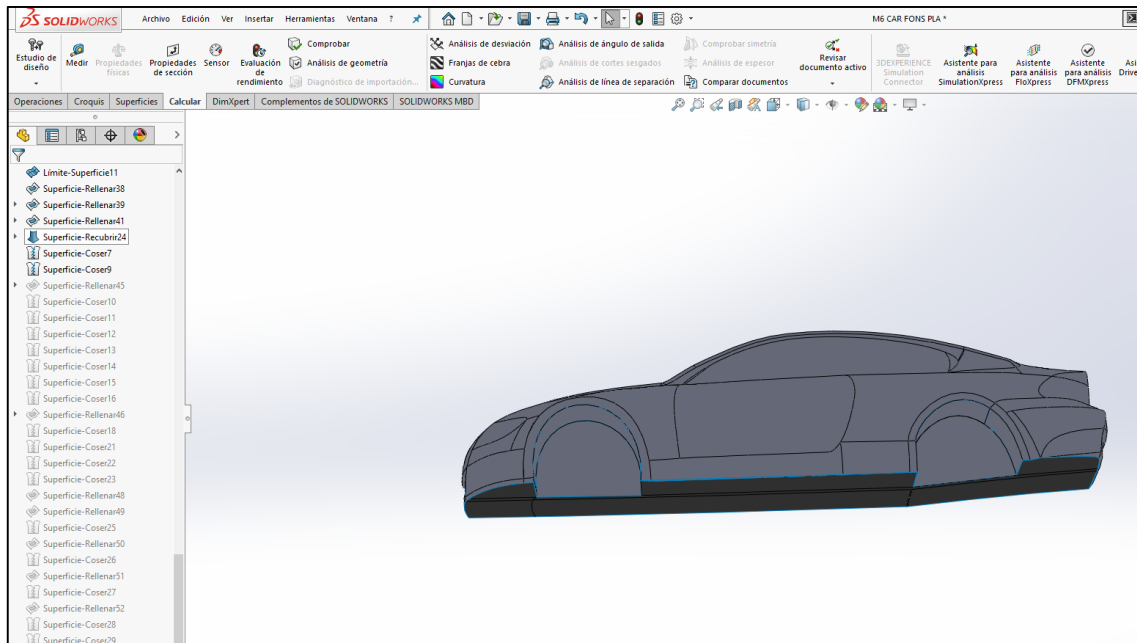
Il·lustració 52: Creació de les superfícies del model CAD – 13 (maleter i vidres).

La última part de la carrosseria ha sigut la posterior, des de el maleter fins al para-xocs.



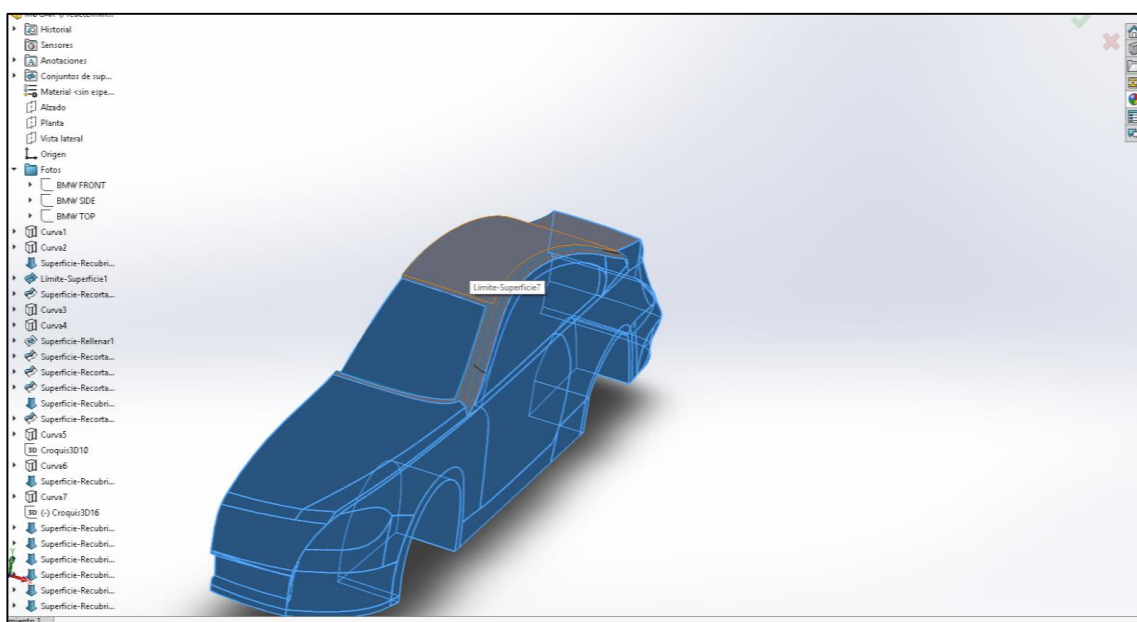
Il·lustració 53: Creació de les superfícies del model CAD – 14 (carrosseria completa).

Un cop finalitzada tota la carrosseria s'ha procedit a la creació del fons pla del cotxe i cobert la zona de les rodes. Cal destacar que el fons s'ha fet pla en una primera instància per facilitar-ne el disseny, però per tal de poder simular el fons d'un cotxe de producció en sèrie real, el qual no és completament pla, més endavant crearem una sèrie de protrusions que enterboleixin el flux d'aire.



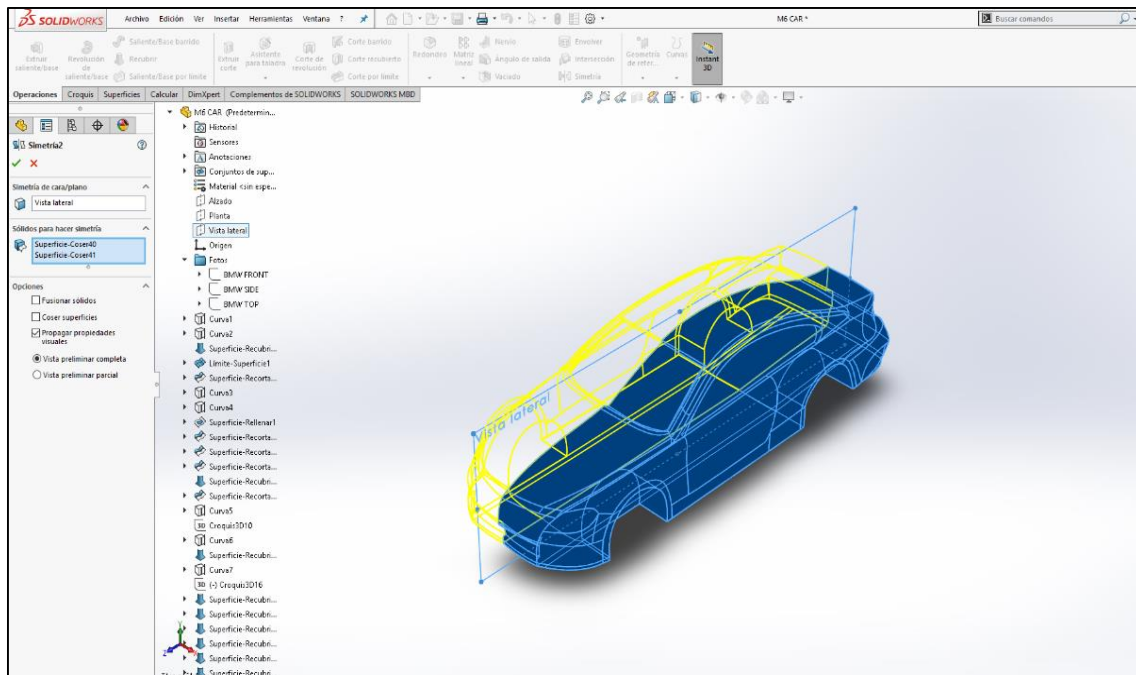
Il·lustració 54: Creació de les superfícies del model CAD – 15 (fons pla).

Un cop finalitzada tota la carrosseria i el fons pla del cotxe s'ha procedit al “cosit” de totes del superfícies que s’han anat generant al llarg de la producció del vehicle. Aquesta operació permet detectar i eliminar petites apertures que hagin pogut quedar entre les superfícies i que en podrien haver causat turbulències en la simulació posterior.



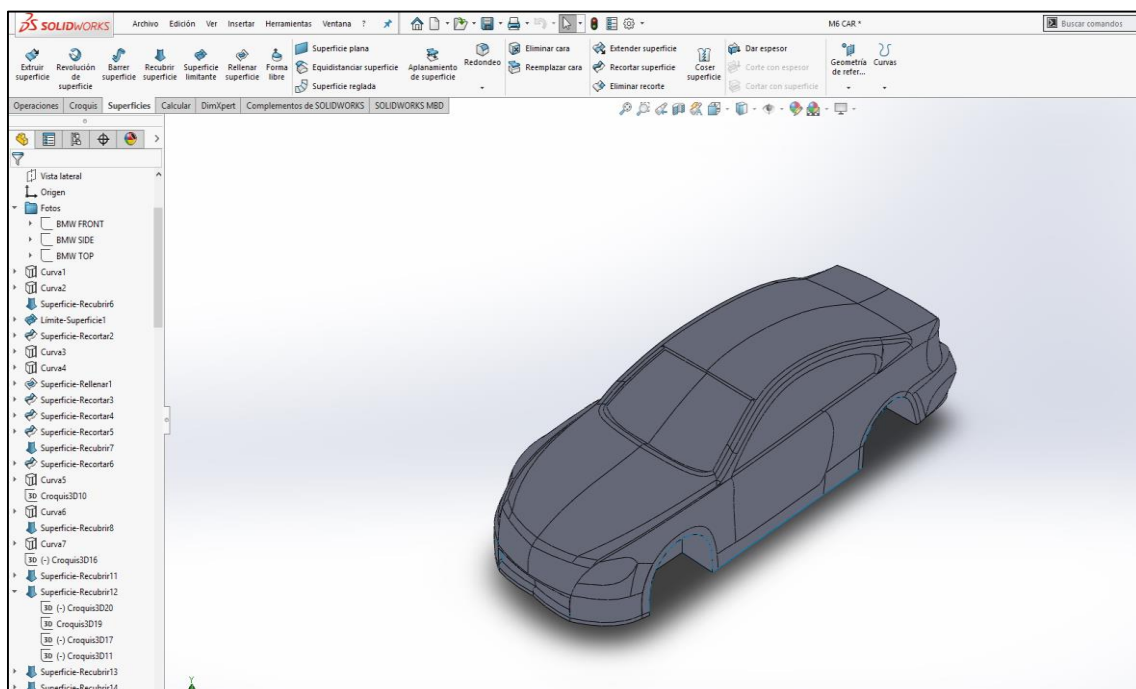
Il·lustració 55: Creació de les superfícies del model CAD – 15 (cosit superficial).

Com que el model CAD s'ha fet fins ara tenint en compte només la part dreta del vehicle, l'últim pas per acabar tota la carrosseria i el fons pla ha estat fer una simetria de totes les superfícies.



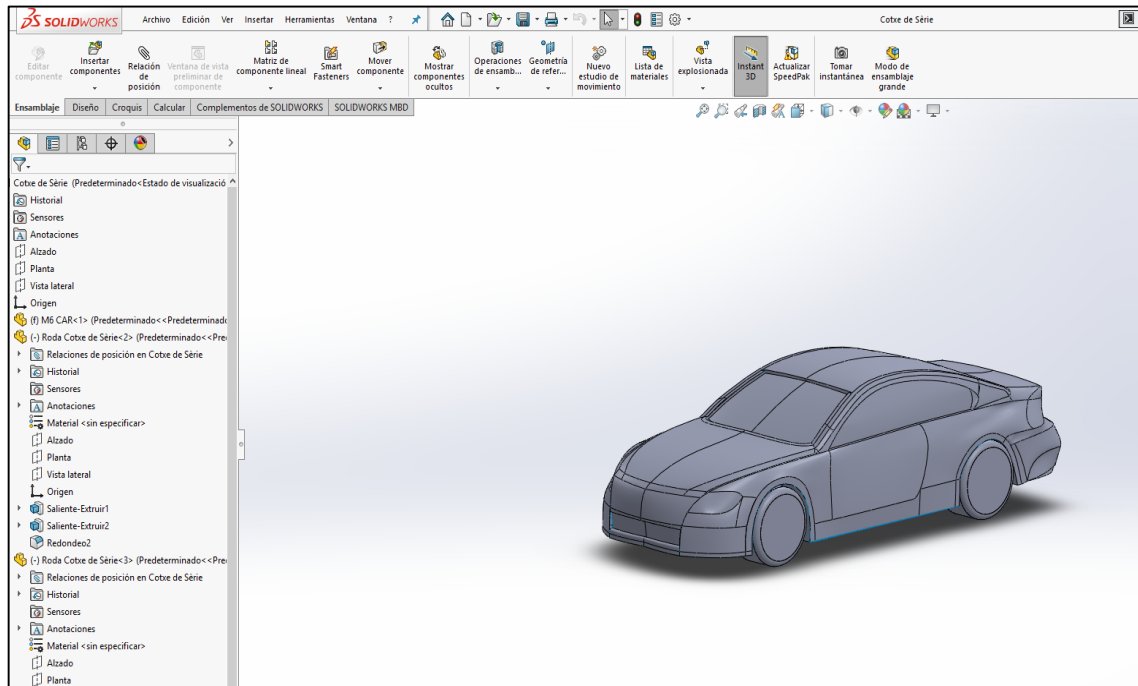
Il·lustració 56: Creació de les superfícies del model CAD – 16 (simetria).

Un cop finalitzada tota la carrosseria i tot el fons pla del BMW M6 de fabricació en sèrie només quedava afegir-hi les rodes i simular les imperfeccions que es troben en els fons plans dels cotxes, ja siguin les suspensions, el càrter, l'escapament, etc.



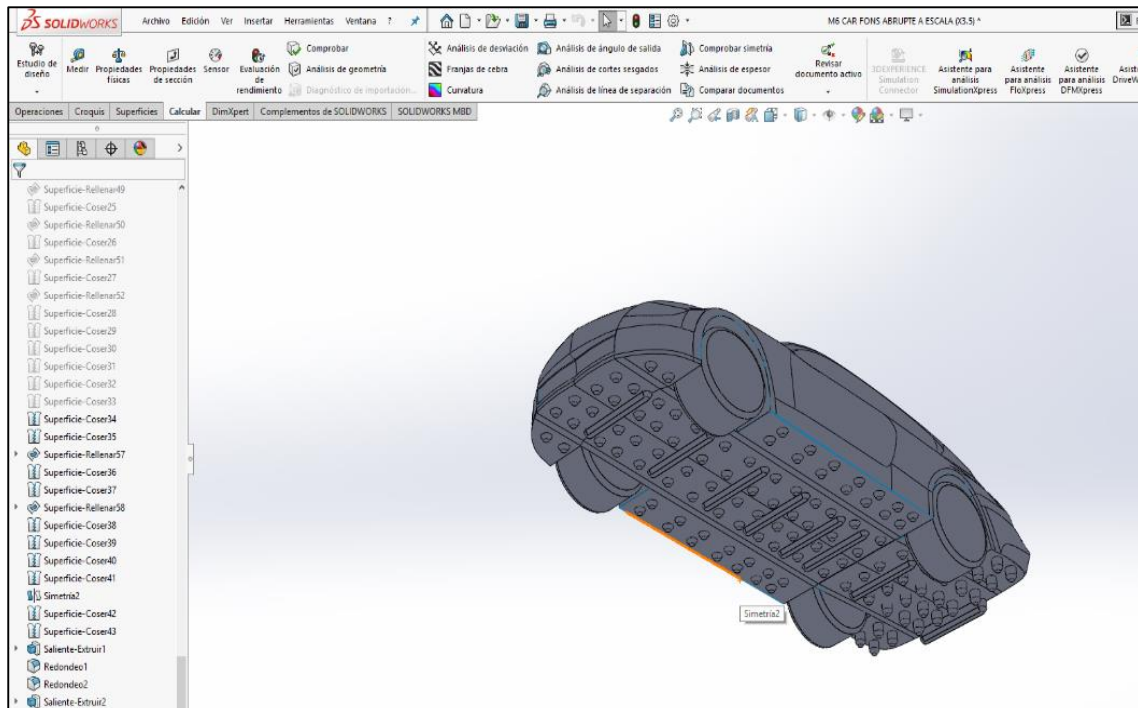
Il·lustració 57: Creació de les superfícies del model CAD – 17 (carrosseria completa).

A continuació s'han insertat les rodes intentant deixar una alçada òptima entre el fons del cotxe i el terra que ens permetés observar correctament el comportament de l'aire.



Il·lustració 58: Creació de les superfícies del model CAD – 18 (rodes).

L'últim element ha estat el fons del cotxe, com ja hem comentat abans el fons s'havia fet completament pla en un inici, però per tal de poder simular el comportament del flux a través del terra d'un cotxe de carrer, s'han inserta unes protrusions que simulen les imperfeccions existents.



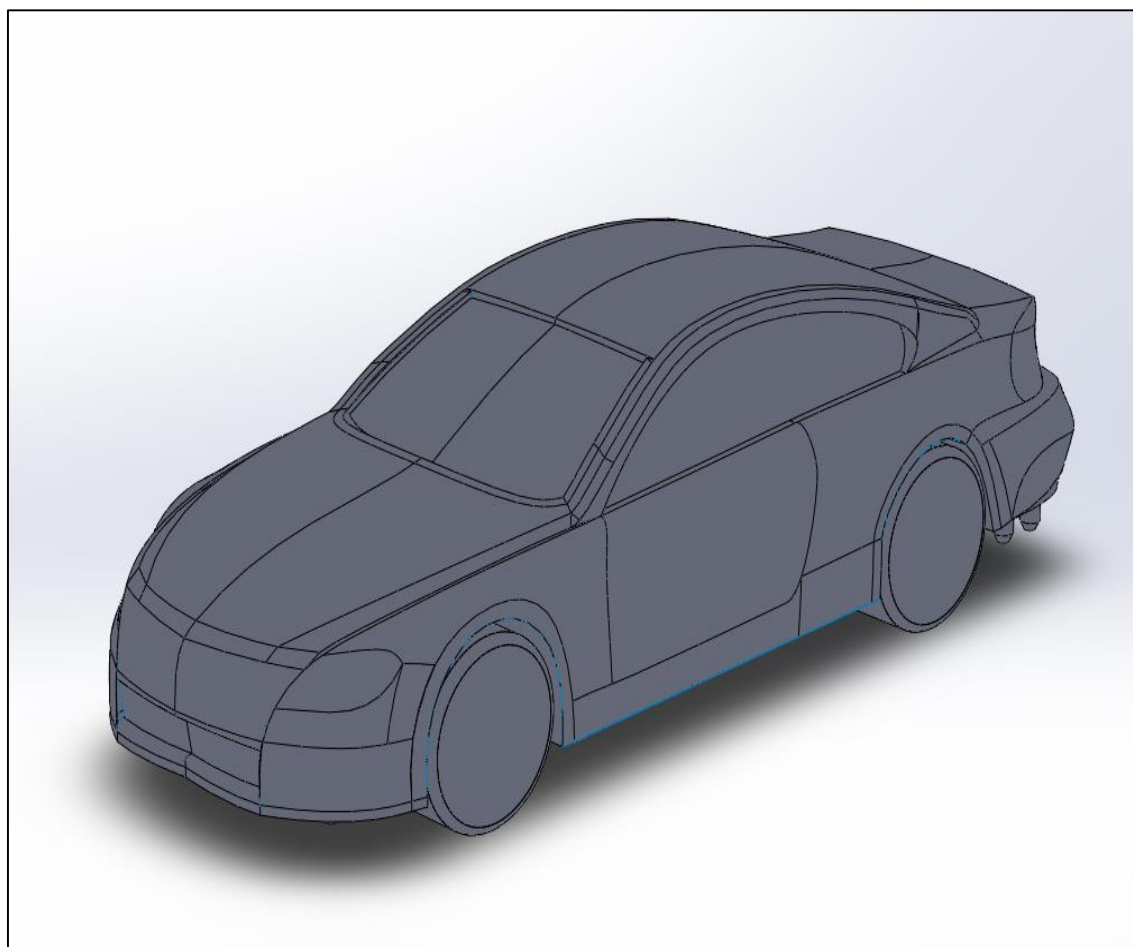
Il·lustració 590: Creació de les superfícies del model CAD – 20 (fons abrupte).

Un cop finalitzada la simulació de les imperfeccions existents en el fons d'un cotxe convencional ja teníem el model pràcticament acabat. L'única correcció que s'ha hagut de fer ha sigut un escalat per tal de deixar les mides del cotxe iguals a les del model real.

Les mides finals del model son les següents:

	MODEL REAL	MODEL CAD
ALÇADA	1374 mm	1384 mm
LLARGADA	4898 mm	4575 mm
AMPLADA	1899 mm	1700 mm

Cal comentar que per tal de simplificar el disseny del cotxe s'han eliminat alguns elements presents en el model real com les manetes, els neteja parabrises, els retrovisors, l'antena, les entrades d'aire, etc. i s'han substituït alguns altres components com les suspensions, el tub d'escapament, i d'altres elements del fons del cotxe que afecten al flux d'aire per unes protrusions que en simularan els efectes.



Il·lustració 60: Model CAD BMW M6.

6. SIMULACIÓ DEL TURISME DE SERIE

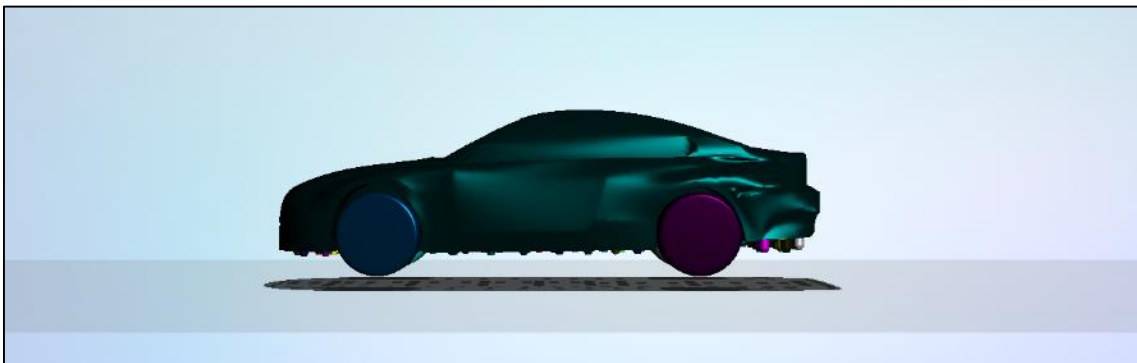
SIMULACIÓ DEL TURISME DE SÈRIE

En aquest apartat s'utilitzarà el programa Flow Design d'Autodesk per tal de simular el comportament del flux d'aire a través del model CAD del BMW M6 Coupe dissenyat així com les pressions que aquest genera al voltant del vehicle a diferents velocitats.

El Flow Design és un programari per a dissenyadors, enginyers i arquitectes de productes que simula un túnel de vent virtual. Aquest software modela el flux d'aire al voltant dels conceptes de disseny per ajudar a provar idees o per veure el comportament del flux al començament del cicle de desenvolupament.

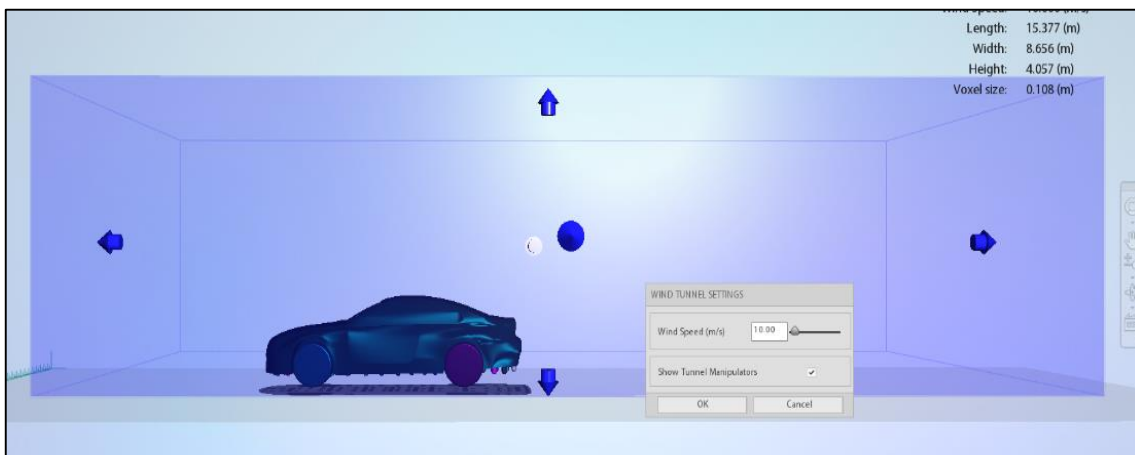
6.1. Anàlisi aerodinàmic del turisme de sèrie

El primer pas a prendre ha sigut la importació del model CAD dissenyat anteriorment al simulador. Per tal d'evitar possibles problemes de compatibilitat s'ha exportat el cos a un format d'arxiu neutral com és el IGES.



Il·lustració 61: Model CAD importat al simulador Flow Design.

Un cop importat el cos s'ha procedit a modificar els marges del túnel de vent i altres paràmetres com la velocitat, les línies de flux o l'escala de colors tant de la velocitat del flux com de la pressió que aquest genera al voltant del cotxe.



Il·lustració 62: Modificació dels marges del túnel de vent.

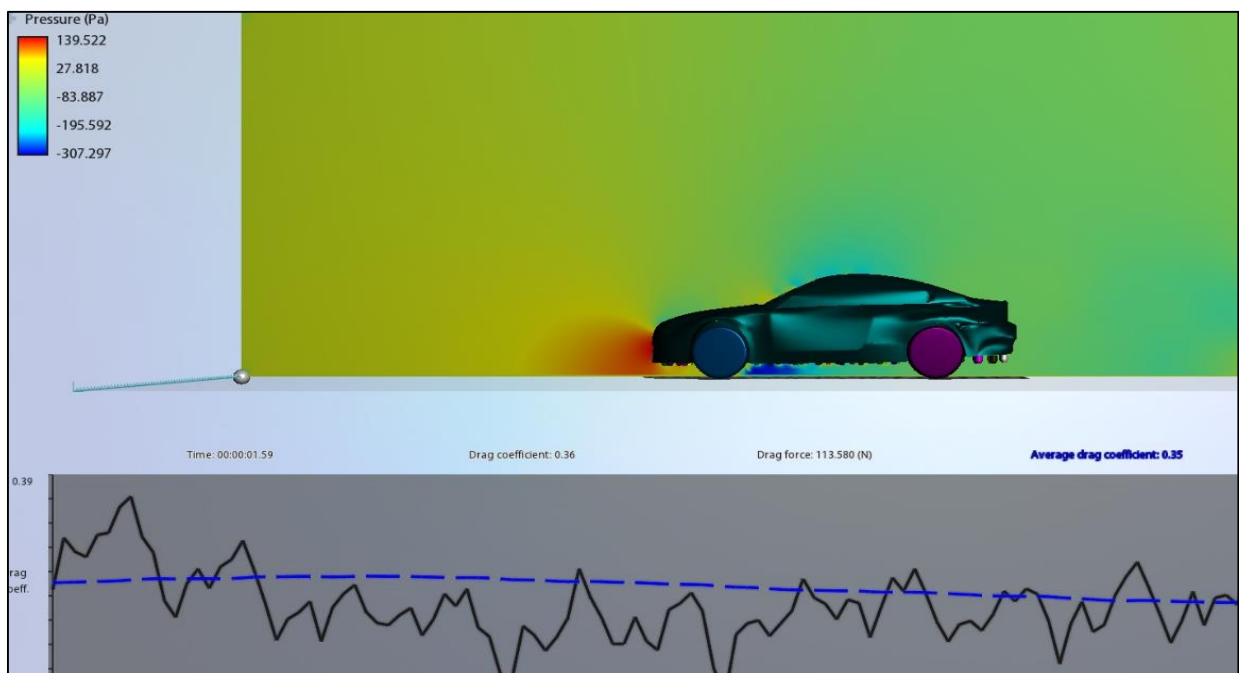
Abans de procedir amb les simulacions tant de la velocitat i la trajectòria de les línies de flux com de les pressions que es generen tant al voltant del vehicle com en la seva superfície, establim uns paràmetres en la velocitat del flux per tal de poder comparar correctament les diferències que hi haurà entre el model normal i el model DTM.

Així doncs, i per tal de poder simular el flux d'aire qualsevol de les possibles situacions de conducció que es poden donar tant en el carrer com en els circuits, simularem tots els factors ja comentat a velocitats de 15m/s (54km/h), 25m/s (90km/h), 50m/s (180km/h) i 80m/s (288km/h).

6.1.1. Simulació de les pressions

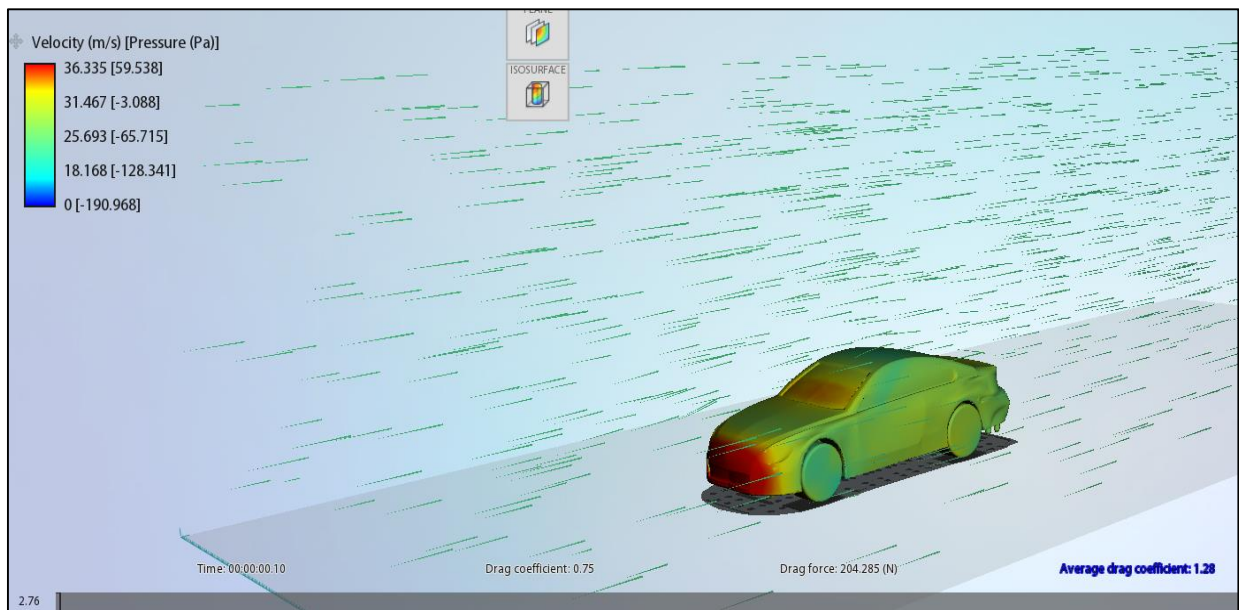
Les primeres simulacions que mostrarem son les de pressió. En aquest apartat ens limitarem a mostrar les imatges de les simulacions de les pressions tant de l'aire com les generades en la superfície del vehicle en les velocitats preestablertes i les comentarem molt breument sense entrar en molt detall.

- **Pressions generades per un flux d'aire a 15m/s (54km/h) al voltant del vehicle.**



Il·lustració 63: Pressió al voltant del cotxe de sèrie a 15m/s.

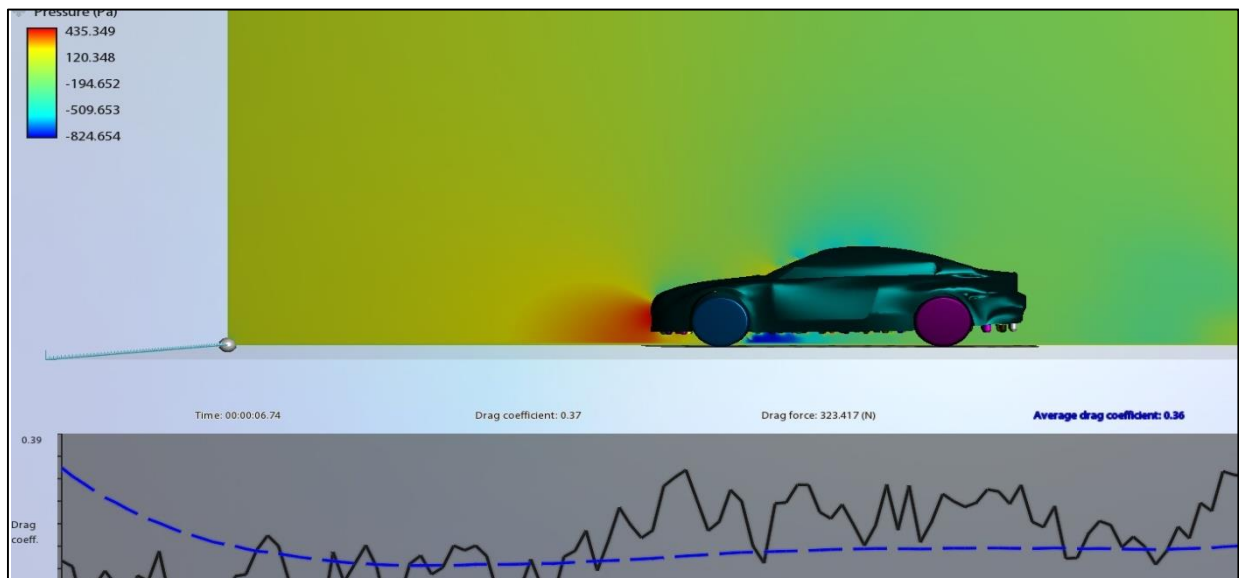
La il·lustració 63 ens mostra la primera simulació 2D de les pressions, en aquesta imatge es pot veure que a 15m/s el cotxe de carrer (sense modificacions) té un coeficient de Drag de 0.36 i un Drag total de 113N. També es pot observar clarament una zona d'alta pressió(139Pa) en la part davantera del vehicle així com una zona de forta depressió en la part inferior del fons pla (-307Pa). Com era d'esperar tant a la part superior com a la part posterior del vehicle es creen petites depressions degudes a l'augment de la velocitat de l'aire que es produeix a causa del perfil del vehicle, similar al perfil alar.



Il·lustració 64: Pressió en la superfície del cotxe de sèrie a 15m/s.

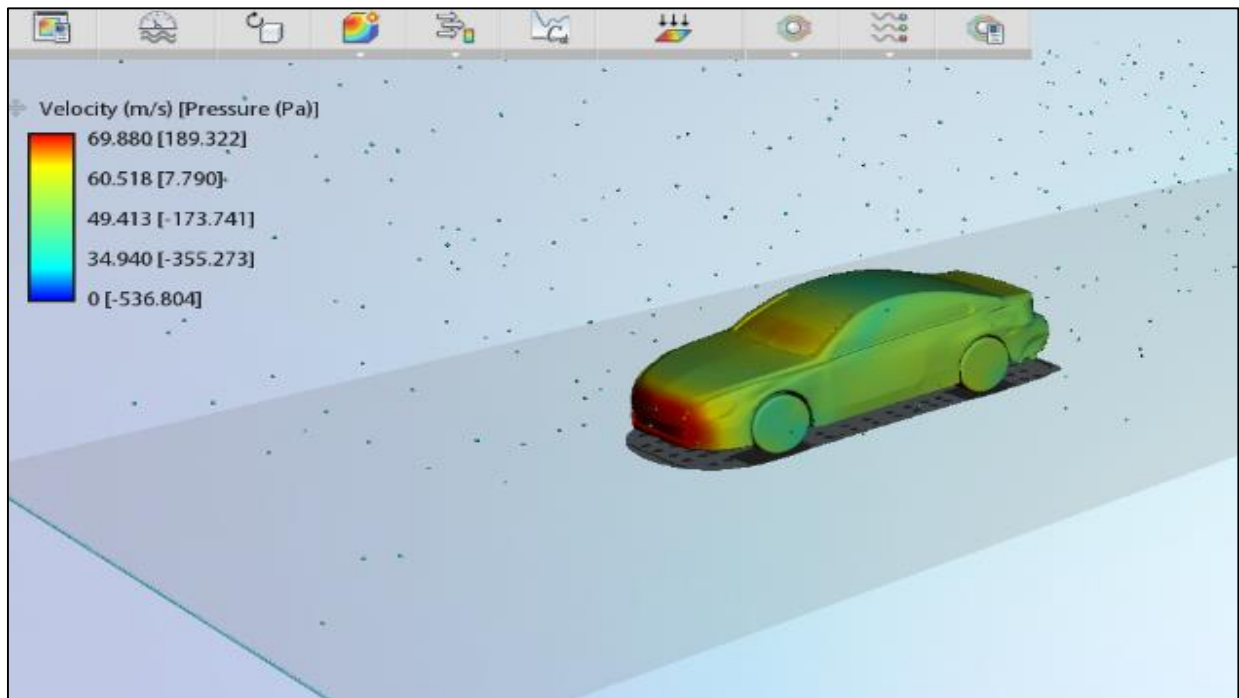
En la il·lustració 64 es pot veure les pressions que es generen en tota la carrosseria del cotxe a una velocitat de 15m/s. Com era d'esperar es genera una forta pressió en la part frontal del cotxe de fins a 59Pa. També és pot observar com en aquest model 3D el Drag ha augmentat molt arribant a valors de 0.75 de coeficient de Drag i fins 204N de Drag total. Això es degut a que les rodes generen molta resistència a l'avanç.

- Pressions generades per un flux d'aire a 25m/s (90km/h) al voltant del vehicle.



Il·lustració 65: Pressió al voltant del cotxe de sèrie a 25m/s.

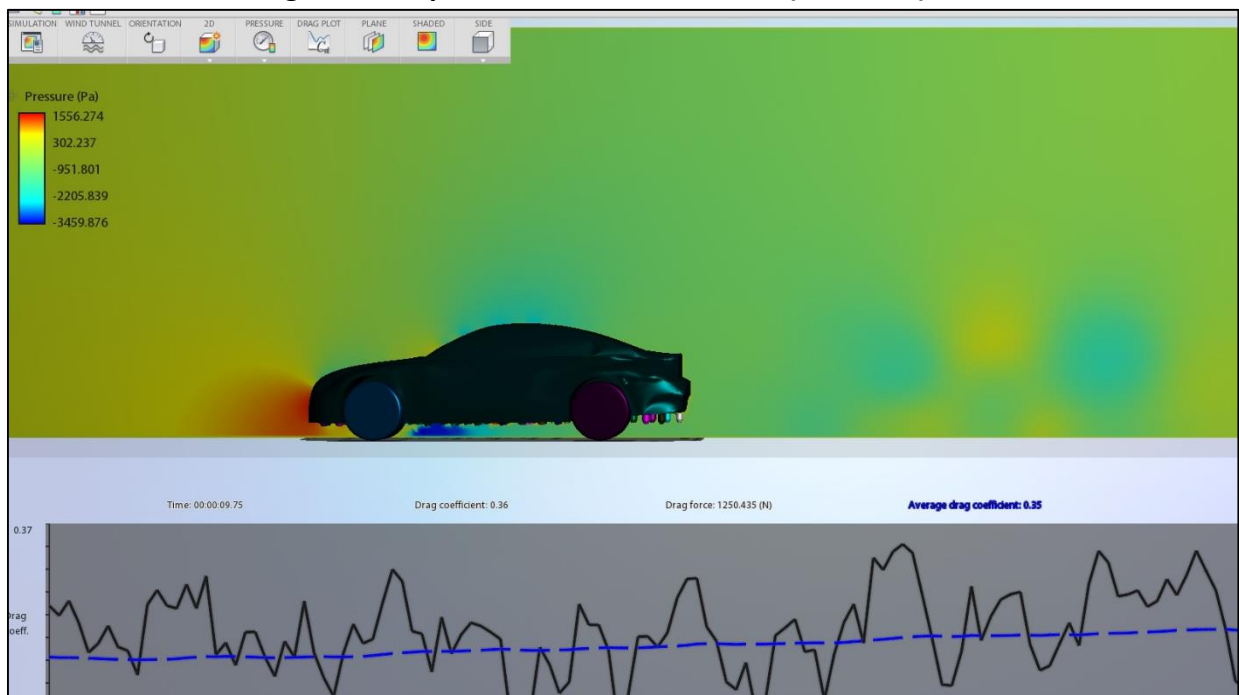
En la il·lustració 65 podem veure que a 25m/s (90km/h) tenim un coeficient de Drag idèntic a l'anterior però el drag total ha augmentat fins a 323N. També podem observar que la pressió màxima en la part frontal del vehicle és de 435Pa mentre que la màxima depressió que es genera en el fons del vehicle ha augmentat fins als -824Pa.



Il·lustració 66: Pressió en la superfície del cotxe de sèrie a 25m/s.

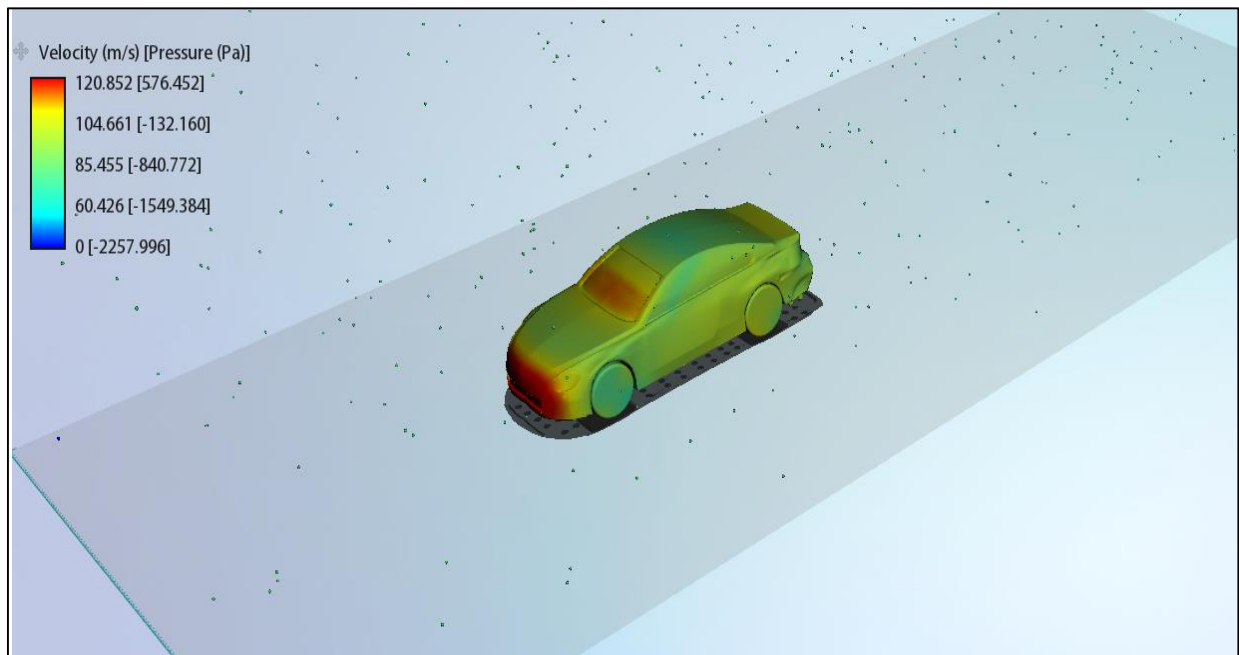
En la il·lustració 66 es poden veure les pressions que es generen en la carrosseria del cotxe a 25m/s. Es genera una pressió en la part frontal del cotxe de fins a 189Pa.

- Pressions generades per un flux d'aire a 50m/s (180km/h).



Il·lustració 67: Pressió al voltant del cotxe de sèrie a 50m/s.

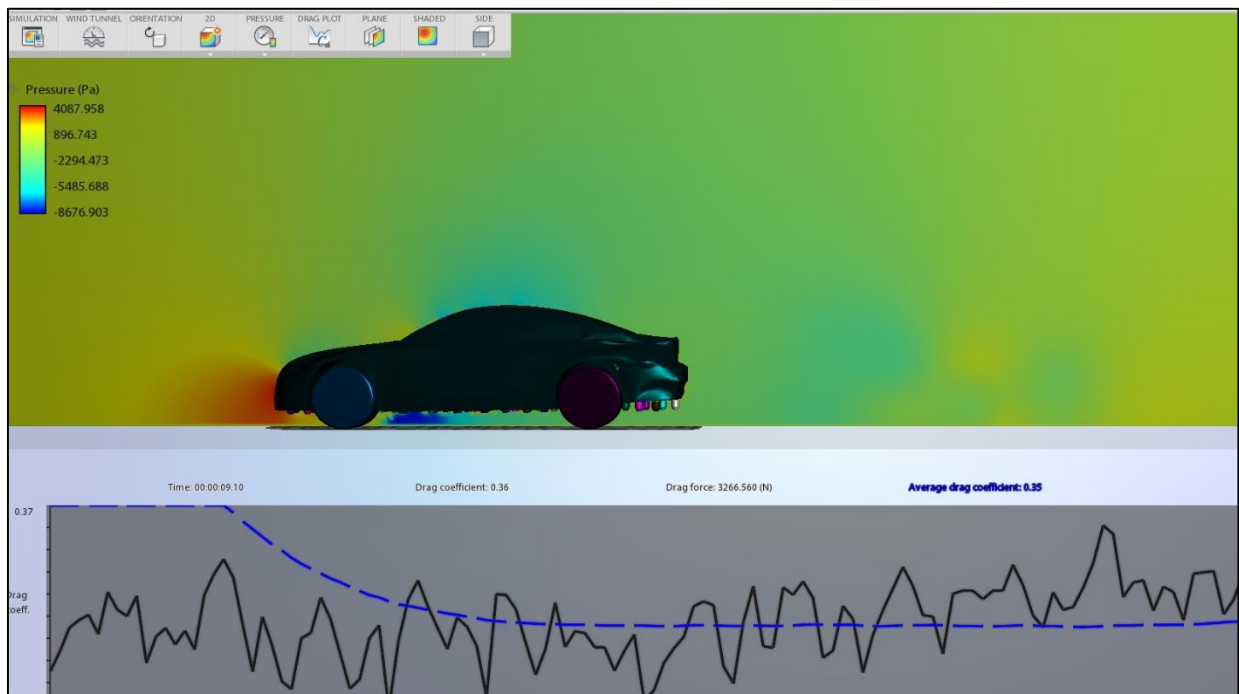
En la il·lustració 67 podem veure que a 50m/s el drag total ha augmentat fins a 1250,4N. També podem observar que la pressió màxima a la part frontal del vehicle és de 1556Pa mentre que la màxima depressió en el fons del vehicle ha augmentat fins als -3459Pa.



Il·lustració 68: Pressió en la superfície del cotxe de sèrie a 50m/s.

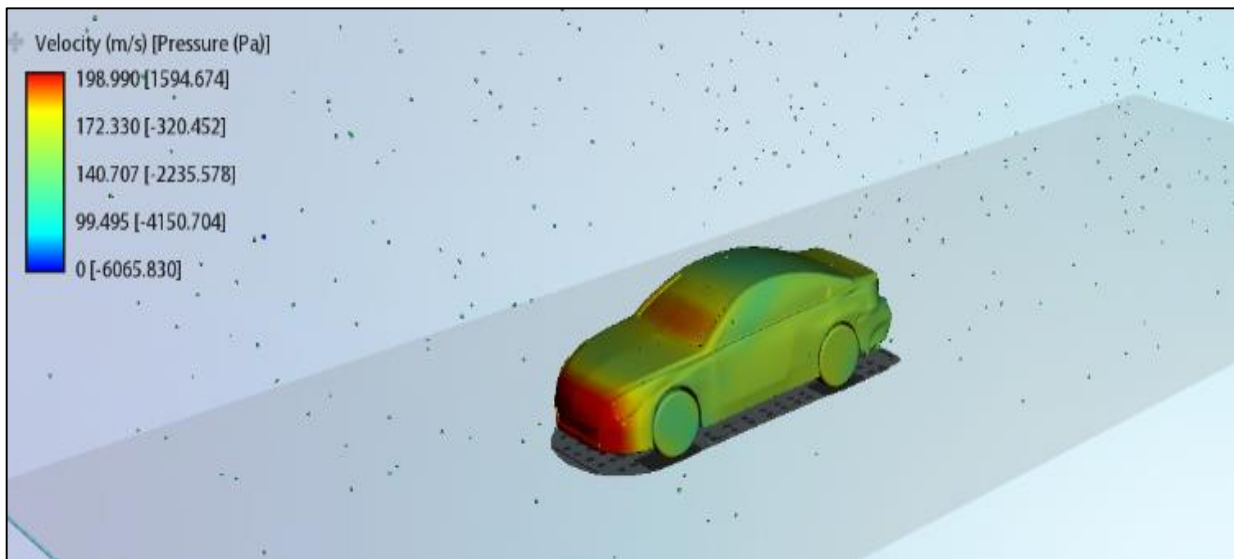
En la il·lustració 68 es poden veure les pressions que es generen en la carrosseria del cotxe a 50m/s. Es genera una pressió en la part frontal del cotxe de fins a 576Pa.

- **Pressions generades per un flux d'aire a 80m/s (288km/h).**



Il·lustració 69: Pressió al voltant del cotxe de sèrie a 80m/s.

En la il·lustració 69 podem veure que a 80m/s el drag total ha augmentat fins a 3266,5N. També podem observar que la pressió màxima a la part frontal del vehicle és de 4087Pa mentre que la màxima depressió en el fons del vehicle ha augmentat fins als -8676Pa.



Il·lustració 70: Pressió en la superfície del cotxe de sèrie a 80m/s.

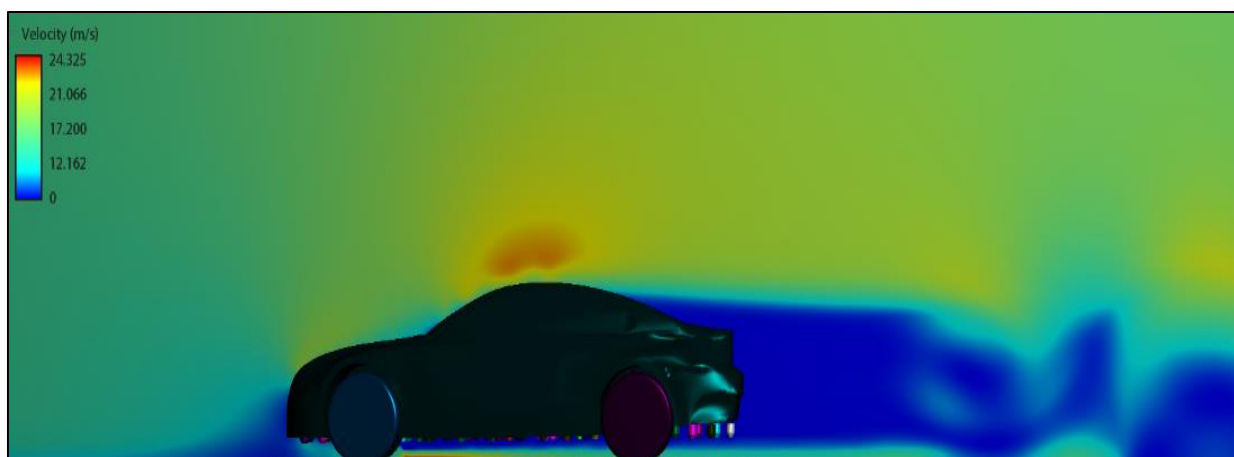
En la il·lustració 70 es poden veure les pressions que es generen en la carrosseria del cotxe a 80m/s. Es genera una pressió en la part frontal del cotxe de fins a 1594Pa.

6.1.2. Simulació de les velocitats

En aquest apartat mostrarem les simulacions de la velocitat de l'aire a través del vehicle.

De la mateixa forma que hem fet amb la simulació de les pressions comentarem breument cadascun dels resultats que han anat sortint en la simulació de les diferents velocitats del flux per finalment entrar en més detall en l'apartat de les conclusions.

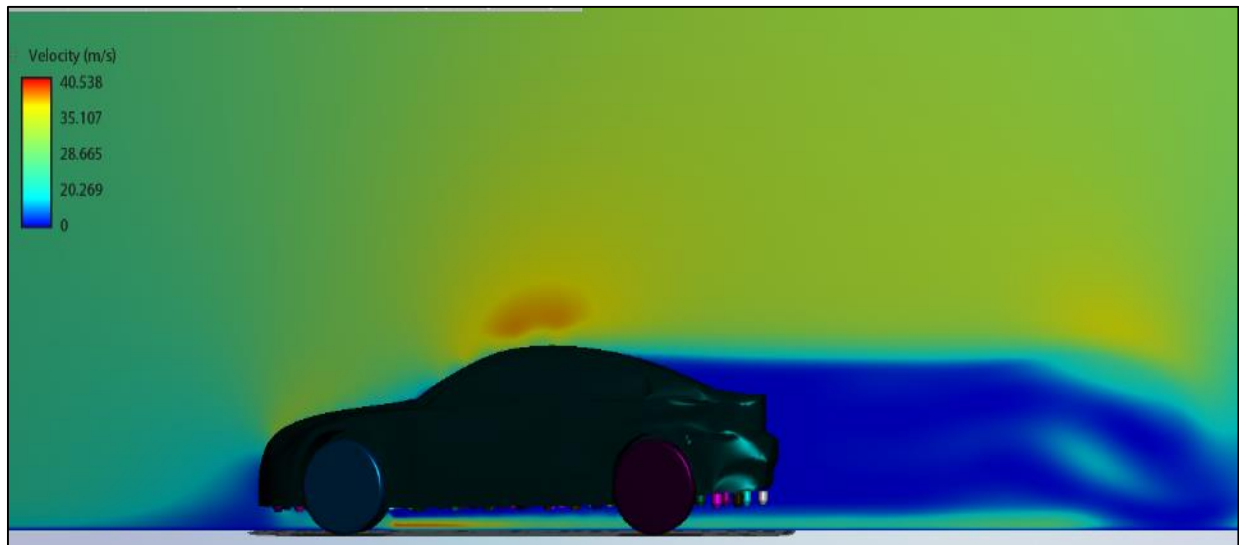
- **Velocitats d'un flux d'aire a 15m/s (54km/h) al voltant del vehicle.**



Il·lustració 71: Velocitat del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 15m/s.

La il·lustració 71 ens mostra la primera simulació de la velocitat del flux al voltant del cotxe. En aquesta imatge es pot veure que partint d'una velocitat inicial 15m/s, el flux s'accelera fins als 24m/s en la zona del fons del cotxe degut a la disminució de la secció disponible generant, com ja hem vist, una zona de depressió.

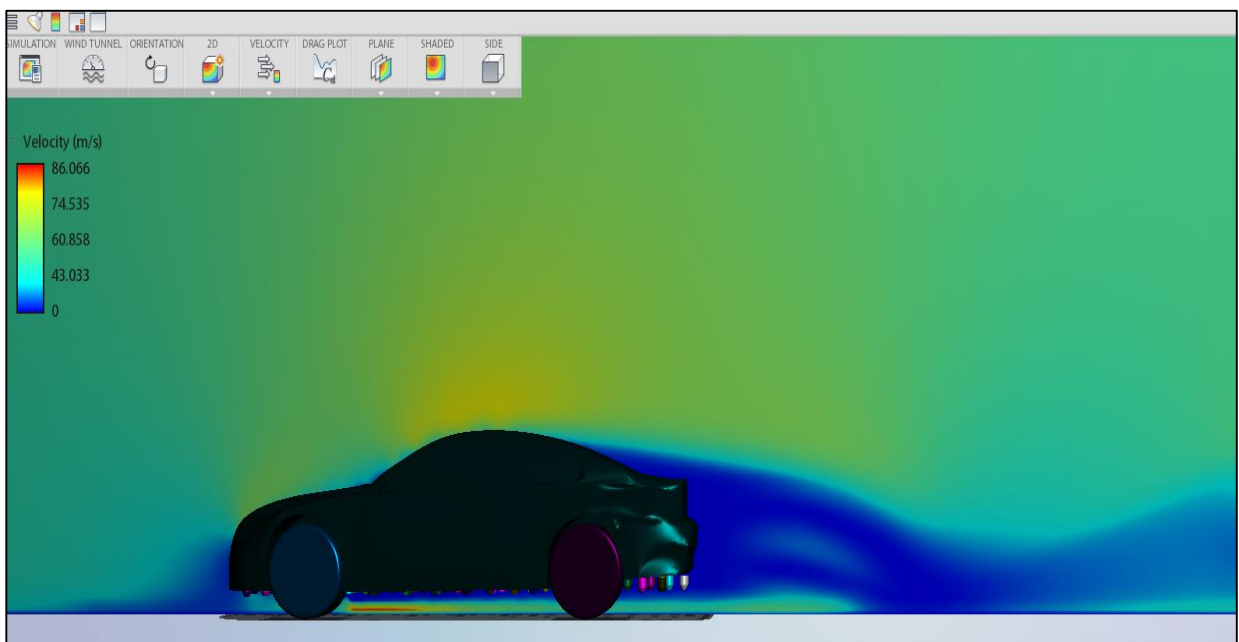
- **Velocitats d'un flux d'aire a 25m/s (90km/h) al voltant del vehicle.**



Il·lustració 72: Velocitat del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 25m/s.

La il·lustració 72 ens mostra la simulació de la velocitat del flux al voltant del cotxe partint d'una velocitat inicial de 25m/s. En aquest cas es pot observar com el flux s'accelera fins als 40m/s en la zona del fons del cotxe.

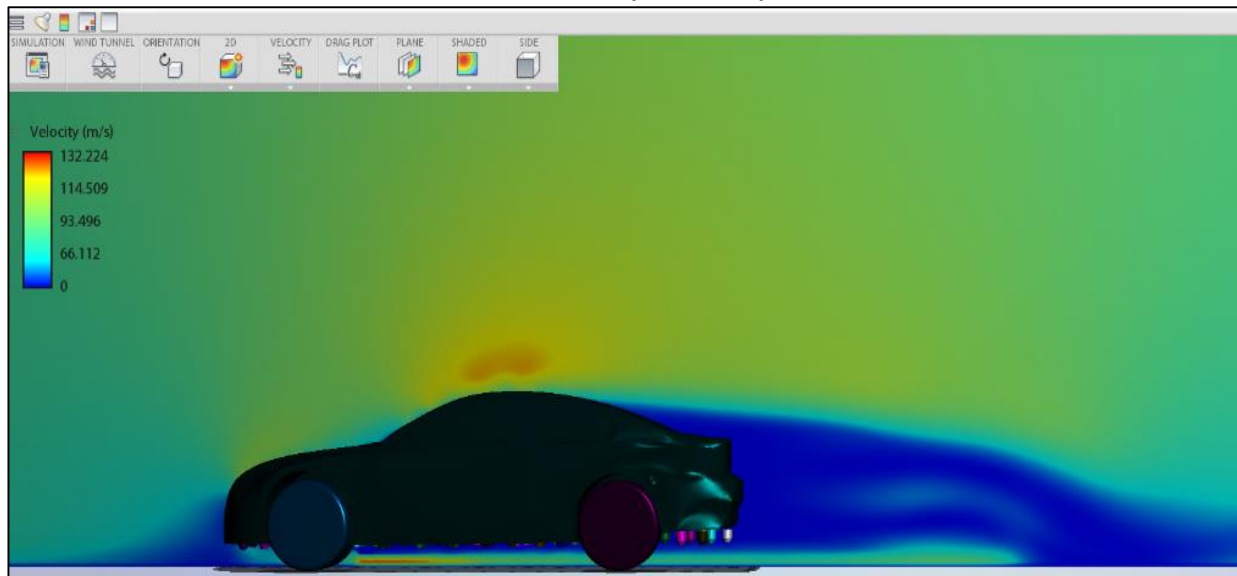
- **Velocitats d'un flux d'aire a 50m/s (180km/h) al voltant del vehicle.**



Il·lustració 73: Velocitat del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 50m/s.

La il·lustració 73 ens mostra la simulació de la velocitat del flux al voltant del cotxe partint d'una velocitat inicial de 50m/s. En aquest cas es pot observar com el flux s'accelera fins als 86m/s en la zona del fons del cotxe.

- **Velocitats d' un flux d'aire a 80m/s (288km/h) al voltant del vehicle.**



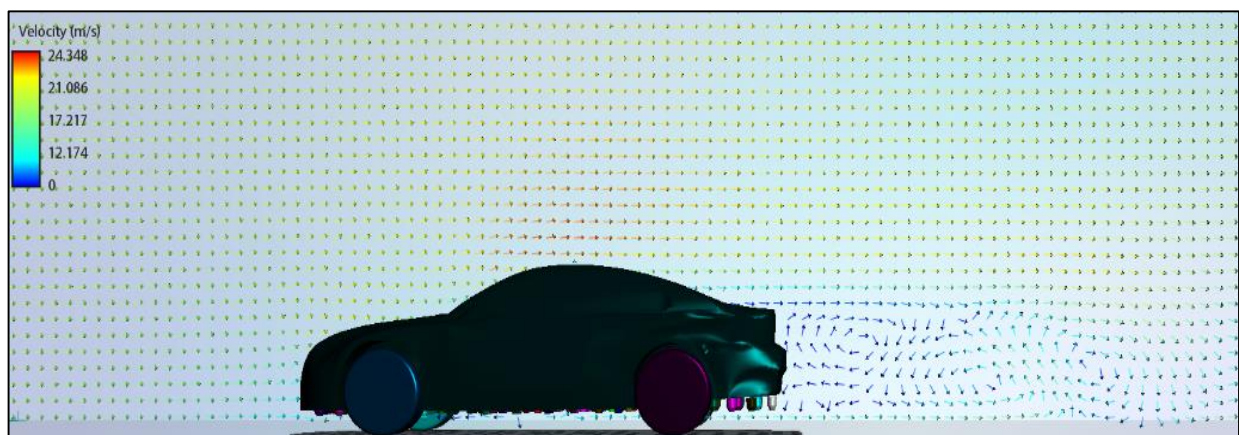
Il·lustració 74: Velocitat del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 80m/s.

La il·lustració 74 ens mostra la simulació de la velocitat del flux al voltant del cotxe partint d'una velocitat inicial de 80m/s. En aquest cas es pot observar com el flux s'accelera fins als 132m/s en la zona del fons del cotxe.

6.1.3. Simulació vectorial

En aquest apartat mostrarem les simulacions de la velocitat de l'aire a través del vehicle mitjançant vectors. El simulador ens permet visualitzar la direcció de les línies de flux de diverses formes: amb vectors, amb línies, amb tubs, amb partícules, etc. Per tal de veure al màxim les possibilitats d'aquest simulador farem servir quatre de les opcions disponibles comentades.

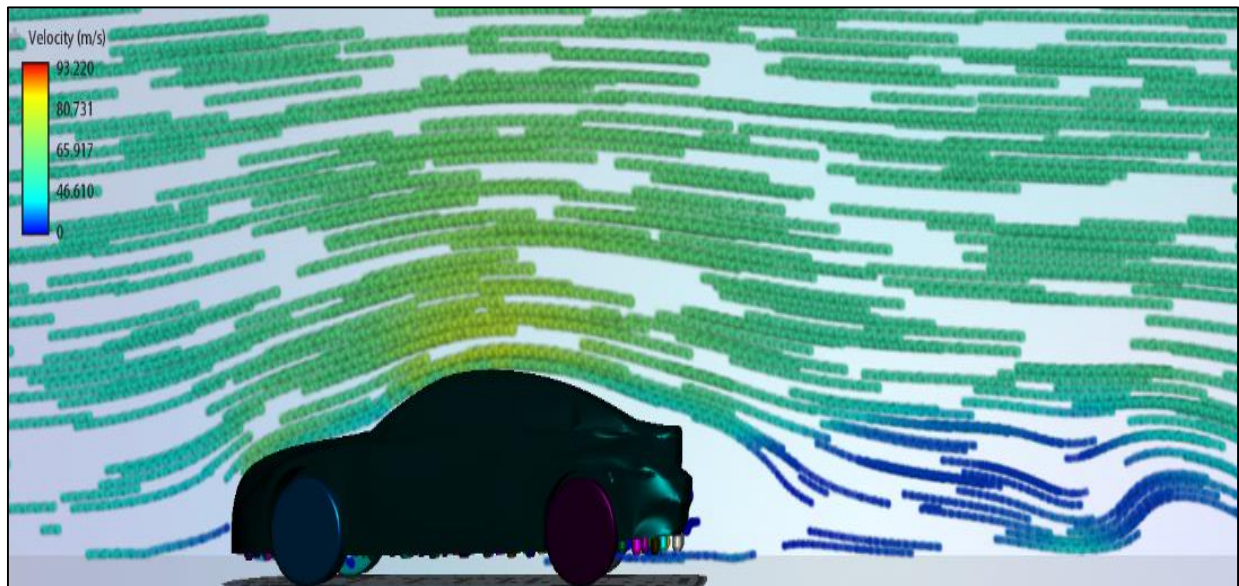
- **Trajectòria del flux d'aire a 15m/s (54km/h) al voltant del vehicle.**



Il·lustració 75: Trajectòria del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 15m/s.

La il·lustració 75 ens mostra la primera simulació de la direcció del flux al voltant del cotxe. En aquesta primera imatge es pot veure la direcció que obté un flux amb velocitat inicial de 15m/s mitjançant vectors.

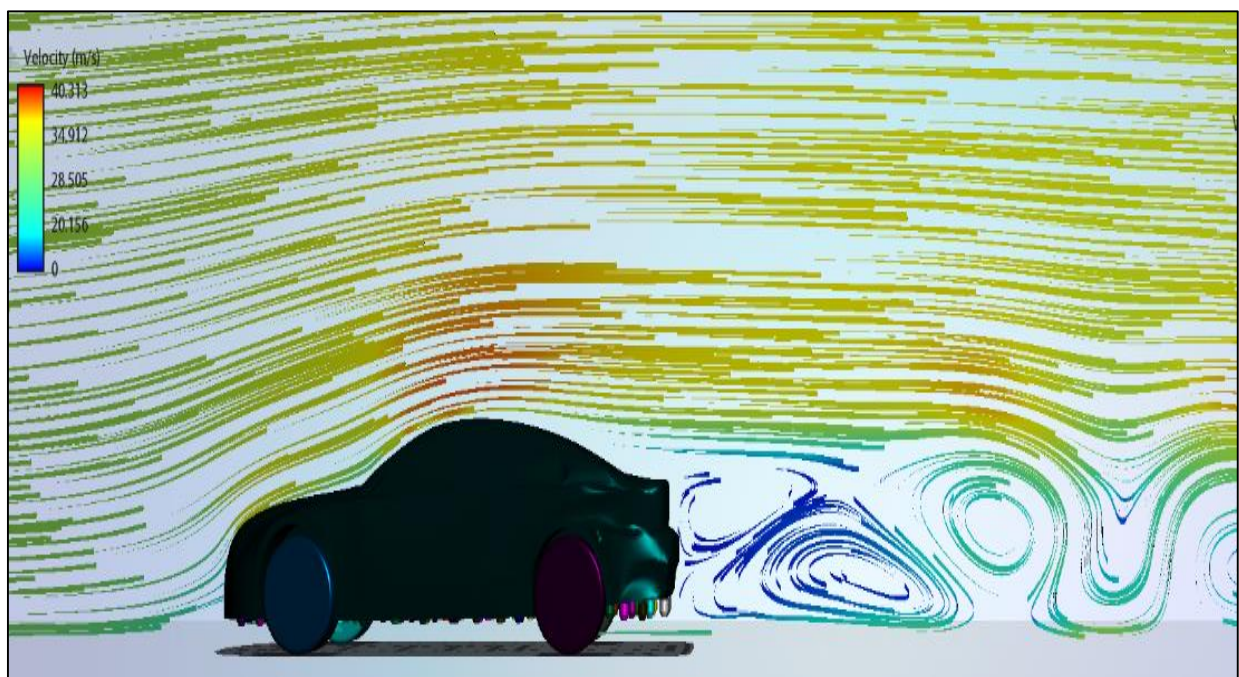
- Trajectòria del flux d'aire a 25m/s (90km/h) al voltant del vehicle.



Il·lustració 76: Trajectòria del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 25m/s.

La il·lustració 76 ens mostra la simulació de la direcció del flux, el qual compta amb una velocitat inicial de 25m/s, al voltant del cotxe mitjançant una simulació de gas.

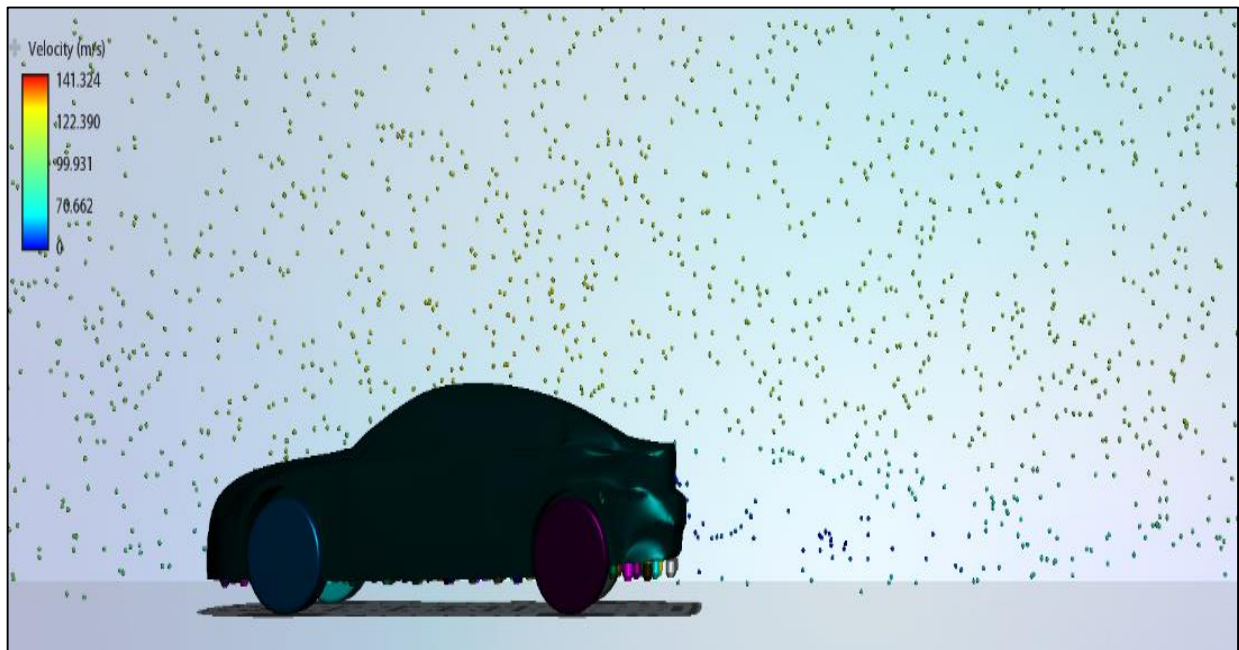
- Trajectòria del flux d'aire a 50m/s (180km/h) al voltant del vehicle.



Il·lustració 77: Trajectòria del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 50m/s.

La il·lustració 77 ens mostra la simulació de la direcció del flux, el qual compta amb una velocitat inicial de 50m/s, al voltant del cotxe mitjançant una simulació amb tubs.

- **Trajectòria del flux d'aire a 80m/s (288km/h) al voltant del vehicle.**



Il·lustració 78: Trajectòria del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 80m/s.

La il·lustració 78 ens mostra la simulació de la direcció del flux, el qual compta amb una velocitat inicial de 80m/s, al voltant del cotxe mitjançant una simulació amb partícules.

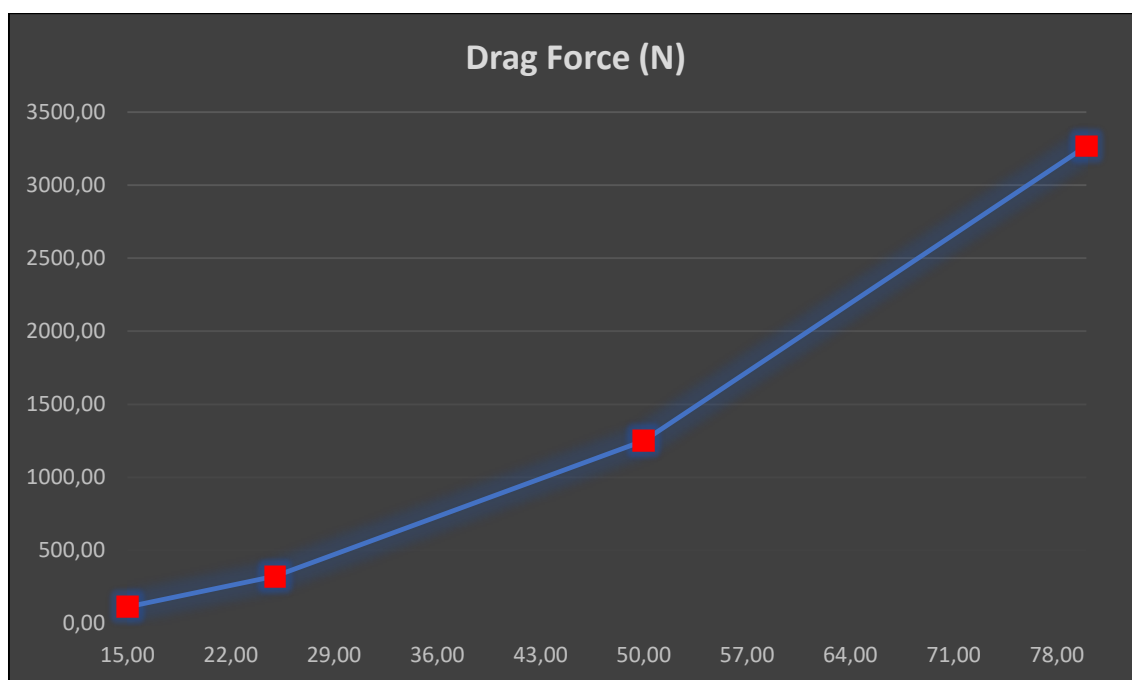
Durant les diverses simulacions hem pogut observar una sèrie de punts importants que més endavant comentarem i compararem amb més detall.

- Les seccions que reben una pressió més elevada son, com era d'esperar, les frontals, tant la zona del para xocs com la del vidre davanter.
- Les zones de depressió son el fons del cotxe i la part superior degut a l'increment de la velocitat del flux i la zona de l'estela que deixa el cotxe degut al buit que es genera.
- Es generen unes fortes turbulències en la part de l'estela del vehicle que generen molta depressió i, per tant, molta resistència a l'avanç.
- El perfil alar que té un vehicle genera un augment de la velocitat de l'aire en la part superior produint sustentació positiva.

6.2. Resum de resultats del anàlisi CFD

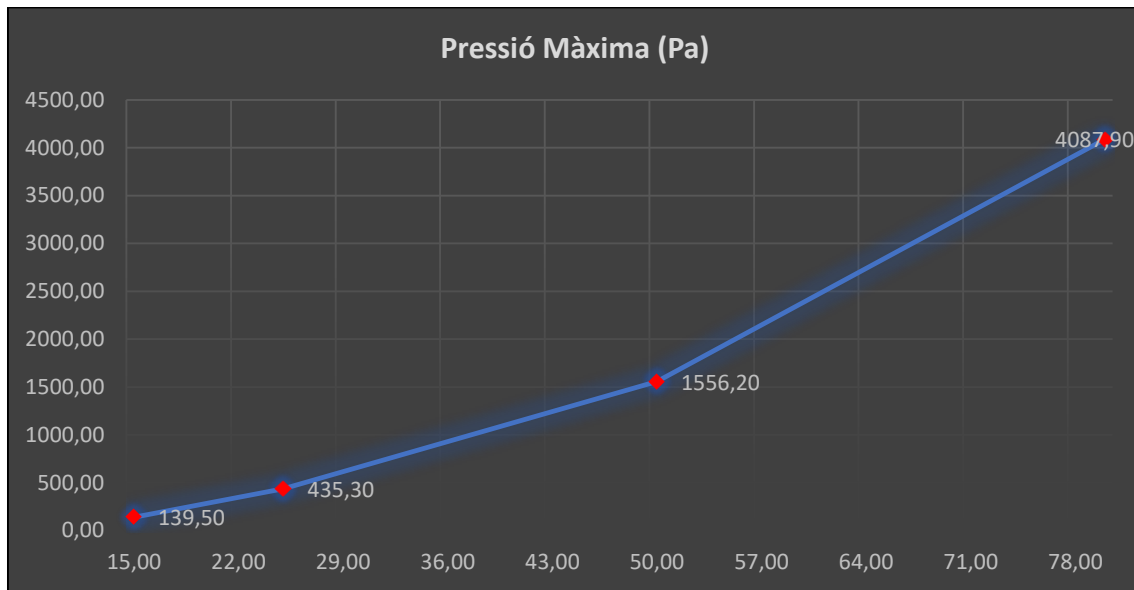
A continuació es farà un petit resum mitjançant una taula de dades i una posterior explicació amb l'ajuda de alguns gràfics dels diversos resultats que s'han anat obtenint al llarg de les simulacions tant de velocitat com de pressions en totes les condicions de velocitats de flux definides anteriorment.

	Drag cf.	Drag Force (N)	Pressió (Pa)		Velocitat màx. (m/s)
			Pres. Màx.	Pres. Min	
15m/s	0.36	113.58 N	139.5 Pa	-307.2 Pa	24.325 m/s
25m/s	0.36	323.41 N	435.3 Pa	-824.6 Pa	40.538 m/s
50m/s	0.36	1250.43 N	1556.2 Pa	-3459.8 Pa	86.066 m/s
80m/s	0.36	3266.56 N	4087.9 Pa	-8676.9 Pa	132.224 m/s



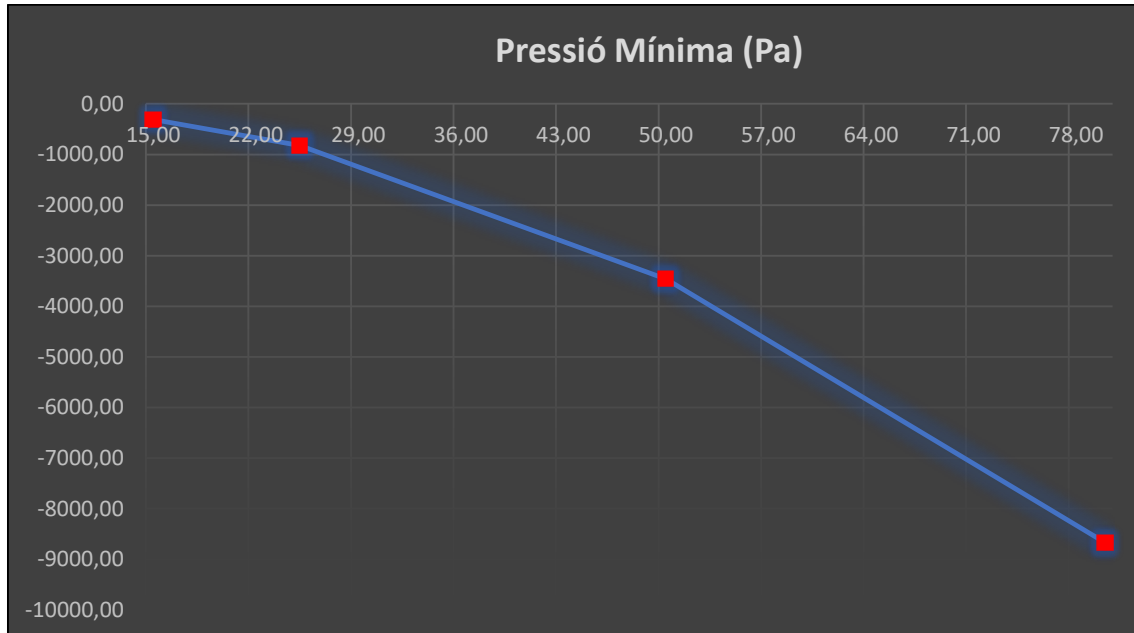
Il·lustració 79: Gràfica de la força total del Drag en el BMW M6.

La il·lustració 79 conté una gràfica que ens mostra l'evolució de la força total generada per el Drag en les diferents simulacions. En aquesta gràfica es pot veure clarament com a mesura que augmenta la velocitat del vehicle, la resistència aerodinàmica que aquest haurà de vèncer augmenta de forma exponencial.



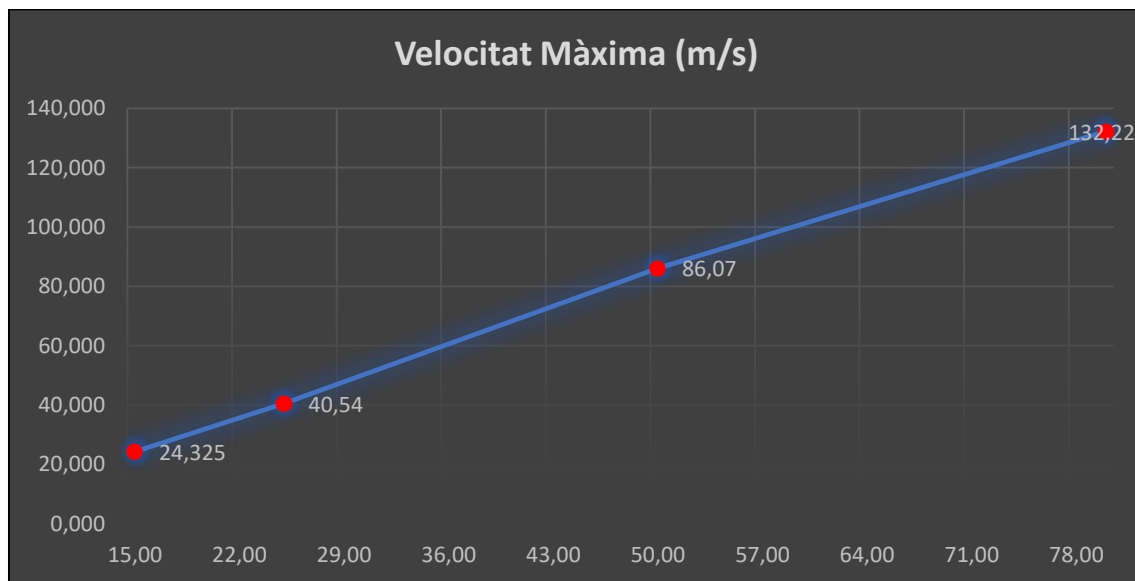
Il·lustració 80: Gràfica de la pressió màxima en el BMW M6.

En la il·lustració 80 es pot observar una gràfica que ens mostra l'evolució de la pressió màxima generada en la part frontal del vehicle en les diferents simulacions. Igual que passava amb la gràfica del Drag es pot veure clarament com a mesura que augmenta la velocitat del vehicle, la pressió màxima augmenta de forma exponencial.



Il·lustració 81: Gràfica de la pressió mínima en el BMW M6.

En la il·lustració 81 es pot observar la gràfica que ens mostra l'evolució de la depressió màxima generada en la zona del fons del vehicle al llarg de les diferents simulacions realitzades. En aquest cas també obtenim un increment exponencial de la depressió màxima que es genera.



Il·lustració 82: Gràfica de la velocitat màxima del flux en el BMW M6.

En la il·lustració 82 es pot observar la gràfica que ens mostra l'evolució de la velocitat màxima del flux al llarg de les diferents simulacions realitzades. En aquest cas obtenim un increment lineal de la velocitat màxima que de l'aire. Cal destacar que aquesta velocitat es genera en el fons del vehicle.

Observant aquests gràfics es poden treure algunes conclusions:

- La Pressió màxima s'incrementa exponencialment a mesura que augmenta la velocitat.
- La depressió màxima també s'incrementa exponencialment a mesura que augmenta la velocitat.
- La velocitat màxima de l'aire augmenta de forma proporcional a la velocitat inicial del flux.
- Tal i com explica l'efecte Bernoulli s'observa que a major velocitat màxima del flux que circula per el fons del vehicle, major depressió es genera.
- Com era d'esperar el coeficient de Drag no depèn de la velocitat i, per tant, s'ha mantingut constant en 0.36 al llarg de totes les simulacions.

7. MILLORES AERODINÀMIQUES

MILLORES AERODINÀMIQUES

Un cop simulat el turisme de sèrie (BMW M6 Coupe) amb el programa Flow Design d'Autodesk, arriba l'hora de fer-hi una sèrie de modificacions introduint alguns dels elements aerodinàmics més importants que hem anat explicant al llarg de tot el projecte per tal de fer que el model final sigui semblant als models utilitzats en la competició del DTM. Aquests elements aerodinàmics ens permetran simular, més endavant, el comportament del flux d'aire al voltant del cotxe del DTM i podrem, així, comparar els models i les variacions en el comportament del flux al voltant dels apèndixs introduïts.

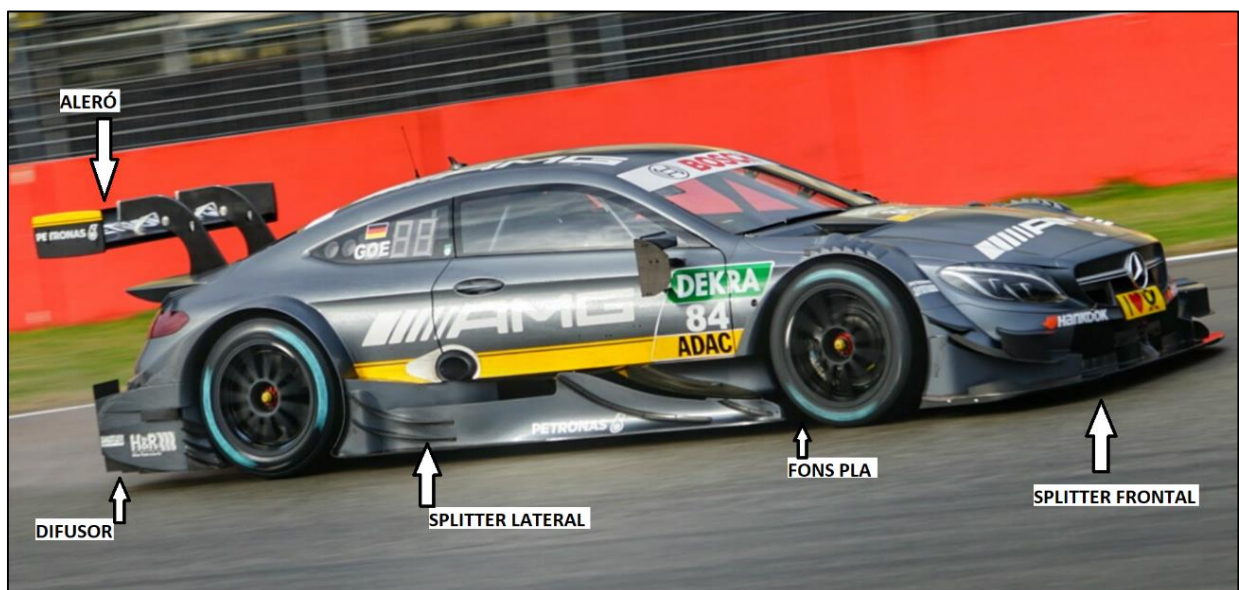
7.1. Elecció dels components aerodinàmics

Els cotxes de competició i, més concretament, els que participen en el DTM, integren un gran nombre d'elements aerodinàmics que augmenten la càrrega aerodinàmica i modifiquen el comportament del flux d'aire per tal de millorar aspectes necessaris en la competició com la tracció, el pas per corba, etc.

Degut a que introduir tots els elements aerodinàmics que porten aquests vehicles comportaria un nombre d'hores i una complexitat tant de disseny com de simulació molt elevada, s'ha fet imprescindible seleccionar només alguns d'aquests components.

Així doncs els elements aerodinàmics que s'han escollit per al disseny final del cotxe han estat els següents: els splitters (frontal i lateral), el fons pla, el difusor i l'aleró posterior.

L'elecció dels elements ha estat basada en el grau d'incidència que aquests tenen en el comportament del flux d'aire així com en la rellevància històrica d'aquests.

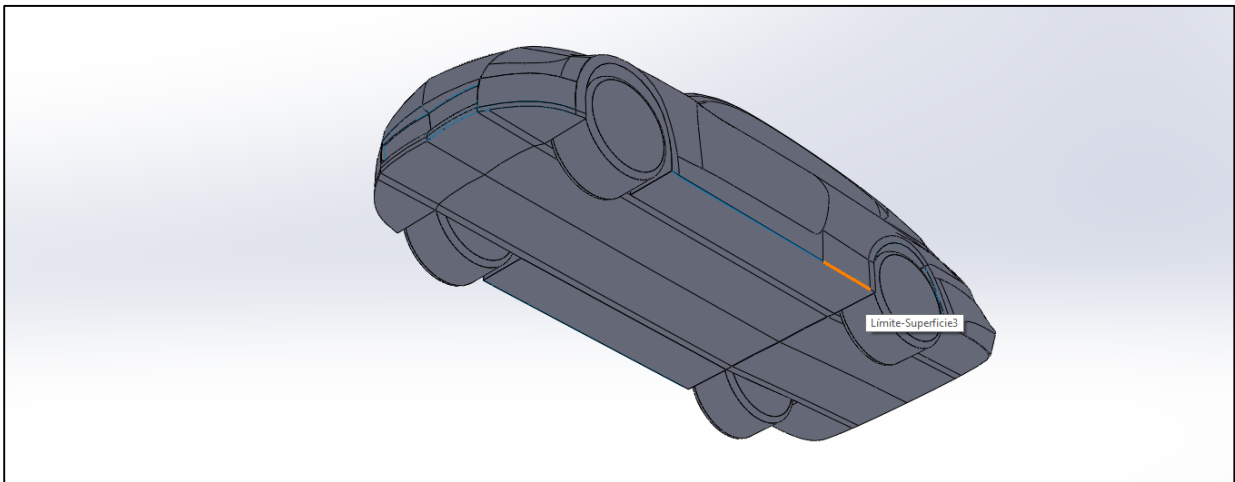


Il·lustració 83: Elements aerodinàmics a introduir.

7.2. Fons pla

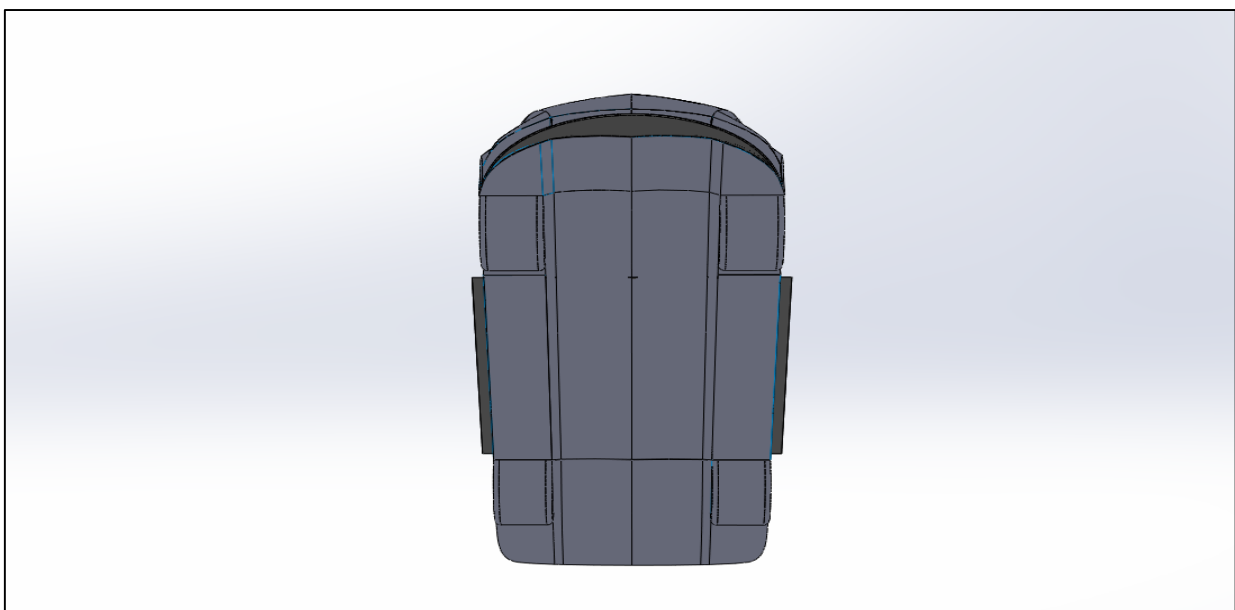
El primer dels elements aerodinàmics que s'introduirà en el cotxe és el fons pla. Aquest element és ahora el que produeix més càrrega aerodinàmica gràcies al gran augment de la velocitat del flux d'aire que circula per la secció entre aquest i el terra.

El disseny d'aquest element aerodinàmic, a diferència dels que introduïrem a continuació, es va fer durant el disseny del cotxe de sèrie per facilitar i, posteriorment, es van simular les imperfeccions que es troben en el fons d'un cotxe de sèrie qualsevol.



Il·lustració 84: Elements aerodinàmics introduïts - Fons pla 1.

Com es veu en la il·lustració 84 aquest element s'ha intentat dibuixar/dissenyar el més pla possible durant tot el fons del cotxe menys la secció de la part posterior a la qual se l'hi ha donat una lleugera inclinació per afavorir la posterior col·locació del difusor.



Il·lustració 85: Elements aerodinàmics introduïts - Fons pla 2.

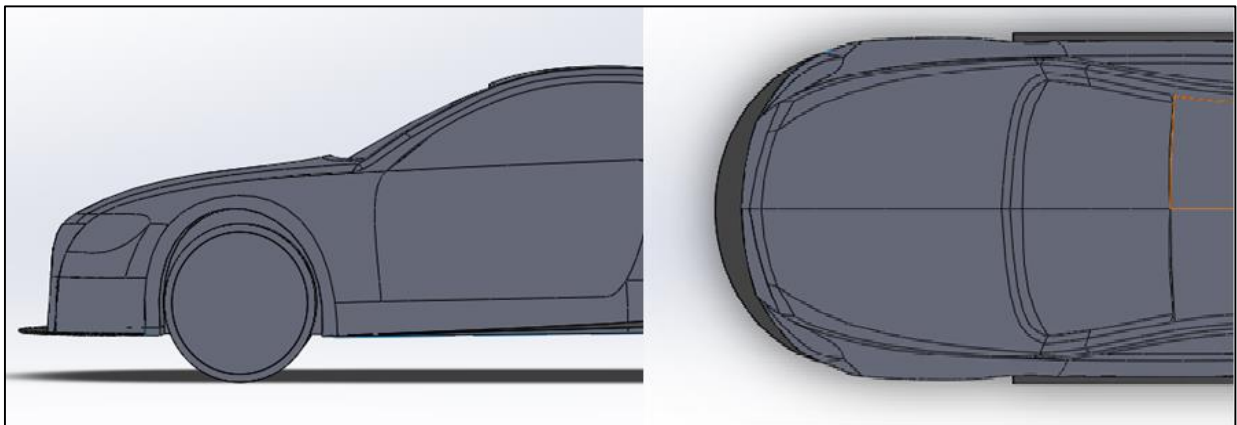
7.3. Spoilers

El segon element aerodinàmic a introduir seran els spoilers, tant el splitter davanter com els spoilers laterals. Aquests han sigut els components aerodinàmics més senzills de dibuixar i introduir en el disseny del cotxe per la seva simplicitat.

7.3.1. Splitter

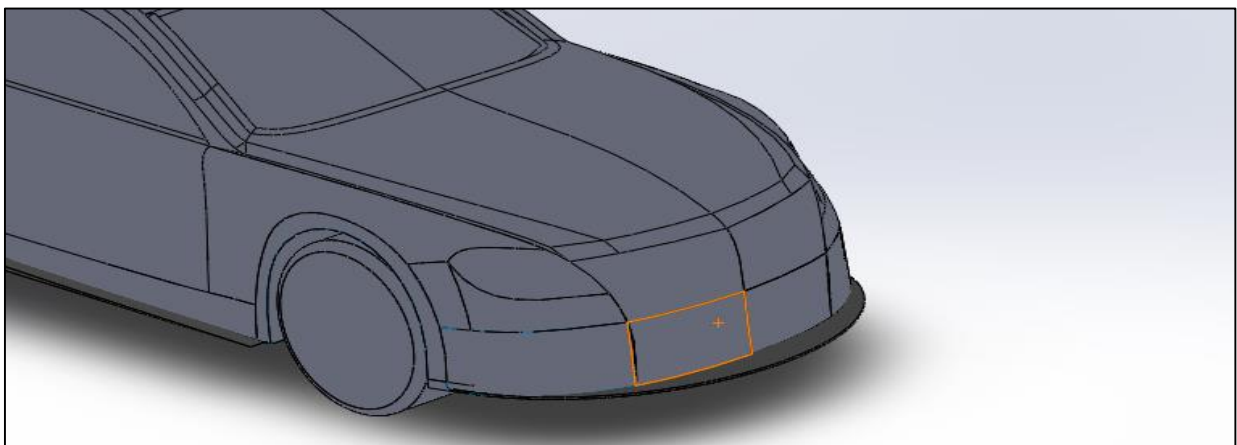
El primer dels spoilers a introduir és el splitter juntament amb una petita millora de la part frontal. Aquest element s'encarrega de dividir el flux produint dos modificacions importants en el flux d'aire de la zona davantera.

El primer dels efectes que genera i que veurem en la simulació del flux és la creació d'una zona de velocitat nul·la i alta pressió en la part frontal del vehicle, tot i que aquesta zona produeix un gran quantitat de resistència aerodinàmica, amb el splitter s'aconsegueix una zona més estable i es generen menys turbulències.



Il·lustració 86: Elements aerodinàmics introduïts - Splitter 1.

El segon efecte que produeix el splitter en el flux d'aire és l'increment de la velocitat de l'aire que circula cap a la zona del fons pla del cotxe a causa de la disminució de la secció disponible entre aquest i el terra. Aquest fet ajuda a millorar el rendiment del fons pla.

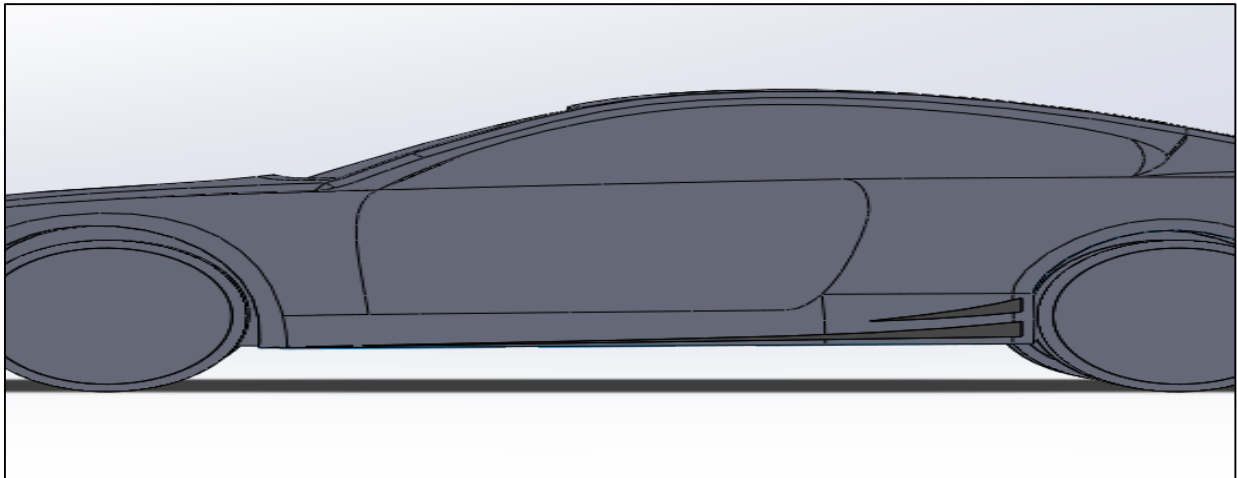


Il·lustració 87: Elements aerodinàmics introduïts - Splitter 2.

7.3.2. Spoilers laterals

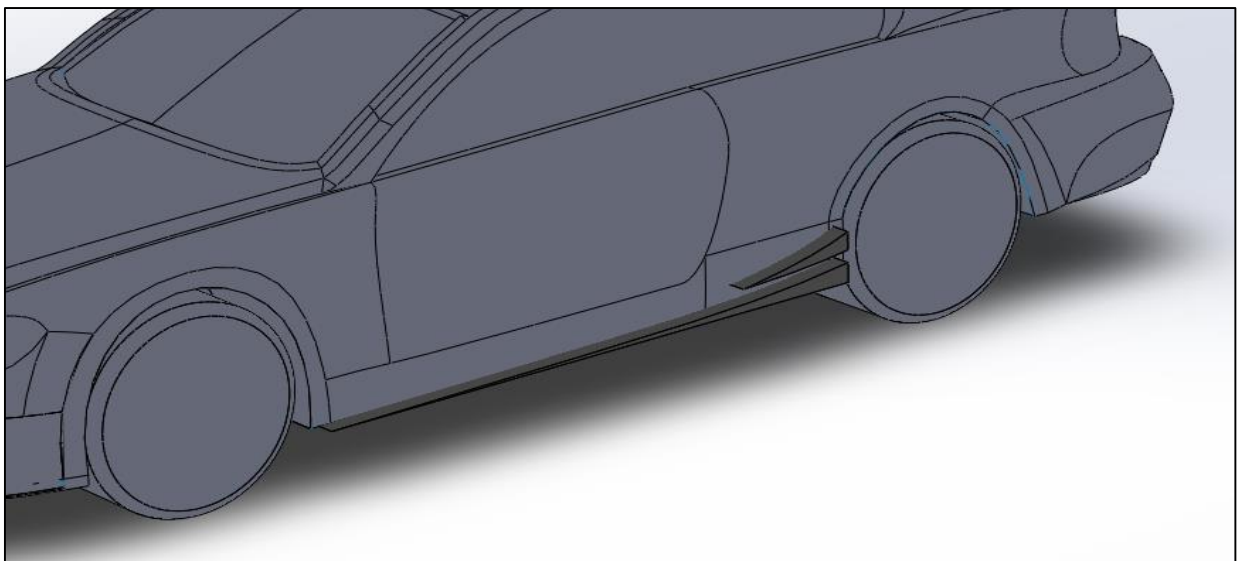
El segon dels spoilers que introduïrem son els laterals. Aquest elements ajuden a conduir el flux d'aire a través del lateral del vehicle i, entre d'altres funcions, ajuden a evitar el desprendiment de la capa límit evitant turbulències innecessàries. A part d'això i, degut al seu perfil, aquests elements també son capaços de generar una petita quantitat de càrrega aerodinàmica.

Cal destacar que en la simulació 2D aquest element no tindrà cap influència en el comportament del flux d'aire ja que s'agafa la secció central del vehicle.



Il·lustració 88: Elements aerodinàmics introduïts - Spoiler lateral 1.

Com es pot veure en les il·lustracions 88 i 89, s'han dissenyat dos cossos que servien per desviar el màxim possible el flux de la zona de les rodes ja que aquestes generen una gran quantitat de turbulències i, per tant, de resistència aerodinàmica.

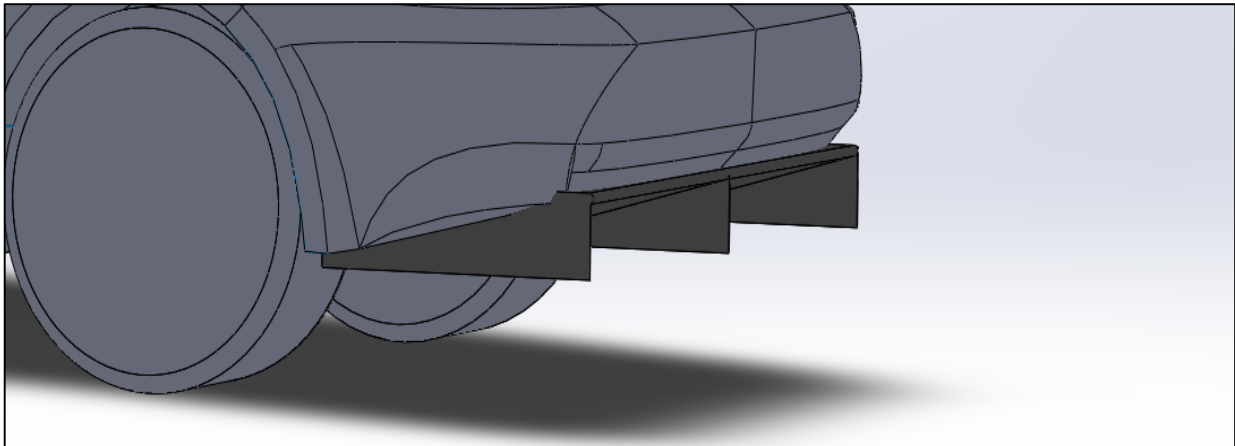


Il·lustració 89: Elements aerodinàmics introduïts - Spoiler lateral 2.

7.4. Difusor

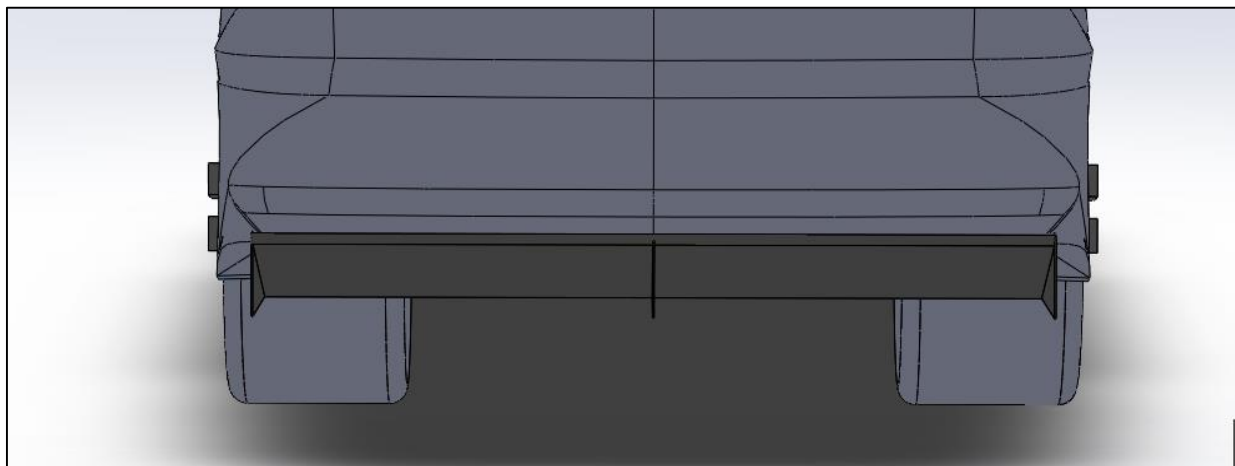
El tercer element a introduir es el difusor posterior. Aquest element proporciona dues millores significatives en el rendiment general del vehicle reduint la resistència aerodinàmica i augmentant el downforce generat en el fons pla del vehicle.

El funcionament d'aquest element consisteix en un augment progressiu de la secció que hi ha entre el fons pla del cotxe i el terra, produint dos modificacions en el flux d'aire molt importants. La primera de les modificacions es que l'augment de la secció comporta una reducció de la velocitat de l'aire i un conseqüent augment de la seva pressió, això dona a l'aire una velocitat i pressió més propera a la de l'aire que es troba en l'estela del cotxe i ajuda a evitar les turbulències que es generen en aquesta zona.



Il·lustració 90: Elements aerodinàmics introduïts - Difusor 1.

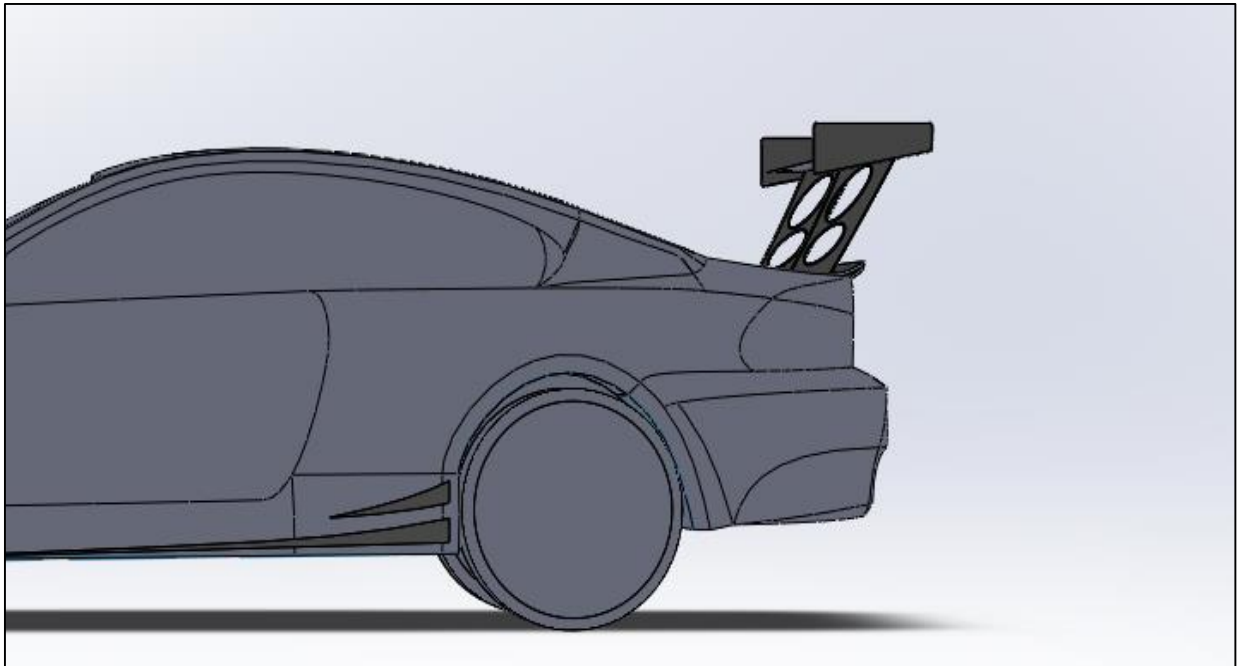
La segona modificació important que aquest element produeix en el flux d'aire que circula a través del fons del vehicle és conseqüència directa de la primera variació ja explicada. L'ajuda en l'evacuació de l'aire que proporciona l'augment de la secció del difusor ajuda a que el flux d'aire que circula a través del fons pla s'acceleri encara més millorant el downforce que genera el fons pla alhora que s'eviten turbulències indesitjades i un possible despreniment de la capa límit gràcies a la millora de la fluïdesa.



Il·lustració 91: Elements aerodinàmics introduïts - Difusor 2.

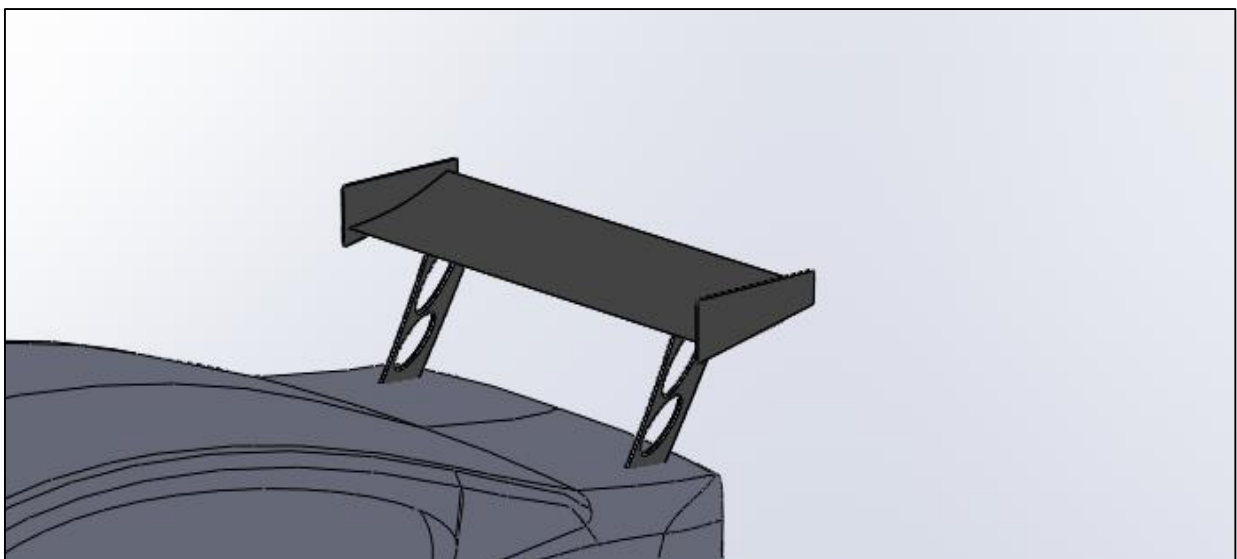
7.5. Aleró

L'últim dels apèndixs aerodinàmics a introduir i el que és possiblement el més famós i amb més trajectòria històrica es l'aleró posterior. Com ja s'ha explicat en el seu corresponent apartat i com es veurà en la simulació, aquest element genera càrrega aerodinàmica en la part posterior del cotxe gràcies al seu perfil.



Il·lustració 92: Elements aerodinàmics introduïts - Aleró 1.

El perfil alar invers amb el que s'ha dotat a aquest component farà que l'aire que passi per la part inferior del aleró s'acceleri degut a que tindrà més secció per recórrer, aquest augment de la velocitat produirà una depressió que espenyerà el cotxe cap a terra.

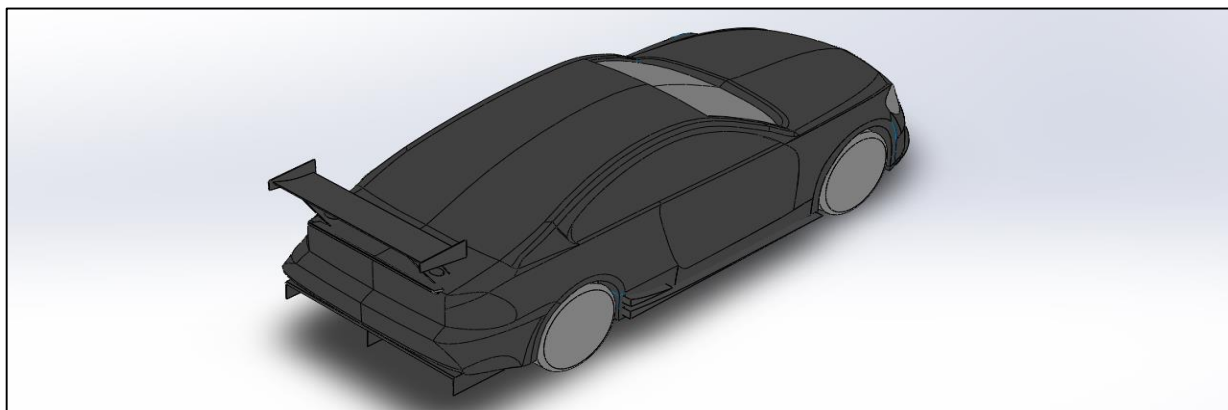


Il·lustració 93: Elements aerodinàmics introduïts - Aleró 2.

8. MODEL DE DTM

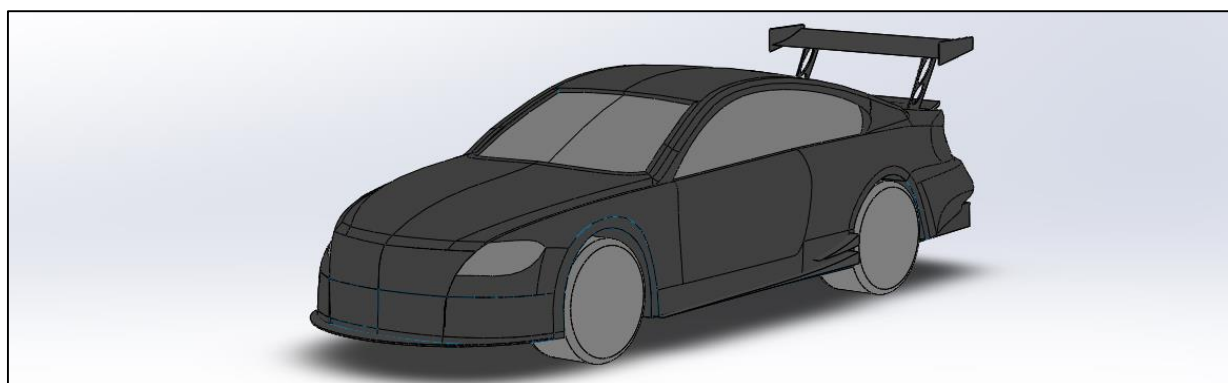
MODEL DE DTM

Un cop dissenyats, dibuixats i implementats tots els elements aerodinàmics triats i mostrats en l'apartat anterior arriba l'hora de visualitzar el que serà el disseny final del cotxe del DTM.



Il·lustració 94: Model DTM Final 1.

Aquest serà el model que més endavant simularem amb el Flow Design per tal de veure quins son els efectes que ocasionen els elements aerodinàmics utilitzats en el món de la competició automobilística, com es comporta el flux d'aire a través del perfil general del vehicle, quines son les pressions generades per l'aire, etc..



Il·lustració 95: Model DTM Final 2.

A continuació es mostra una taula amb les mides finals del model del DTM:

MODEL DTM	
ALÇADA	1443
LLARGADA	4833
AMPLADA	1790

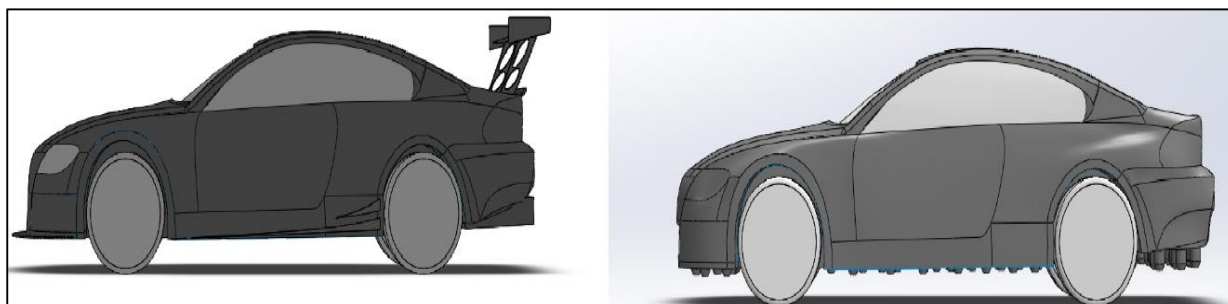
8.1. Comparació dels models

Per tal de, més endavant, poder analitzar i comparar les variacions en el flux d'aire així com les pressions que aquest genera tant en un vehicle de carrer com en el mateix model preparat per el DTM, es fa imprescindible comparar visualment els dos models.

Degut a algunes de les modificacions introduïdes com el Splitter, els spoilers laterals o l'aleró posterior, les mides generals del vehicle s'han vist una mica modificades. Així doncs, es mostra una taula comparativa de les mides generals dels models CAD tant del cotxe de sèrie com del model final del DTM.

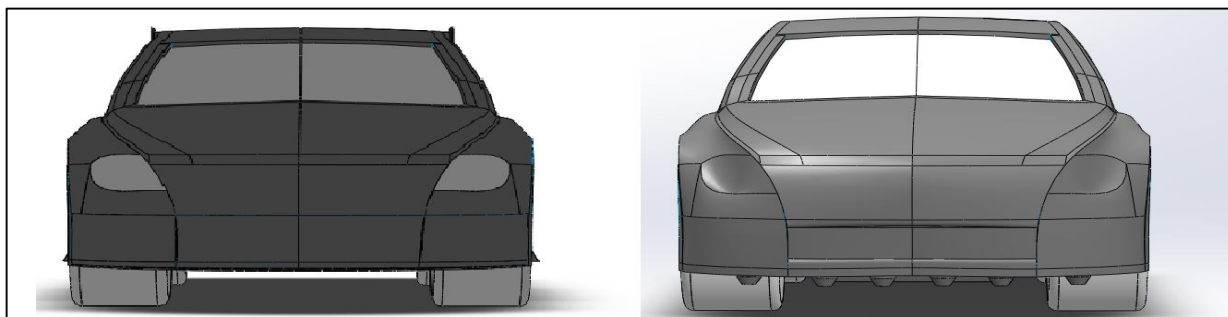
	MODEL INICIAL	MODEL DTM
ALÇADA	1384 mm	1443
LLARGADA	4575 mm	4833
AMPLADA	1700 mm	1790

A continuació es mostraran una sèrie d'il·lustracions comparatives amb algunes de les vistes d'ambos models que ens ajudaran a veure amb claredat les principals diferències i modificacions que s'han introduït en el model de carrer per fer-lo semblant a un dels models utilitzats en la competició del DTM.



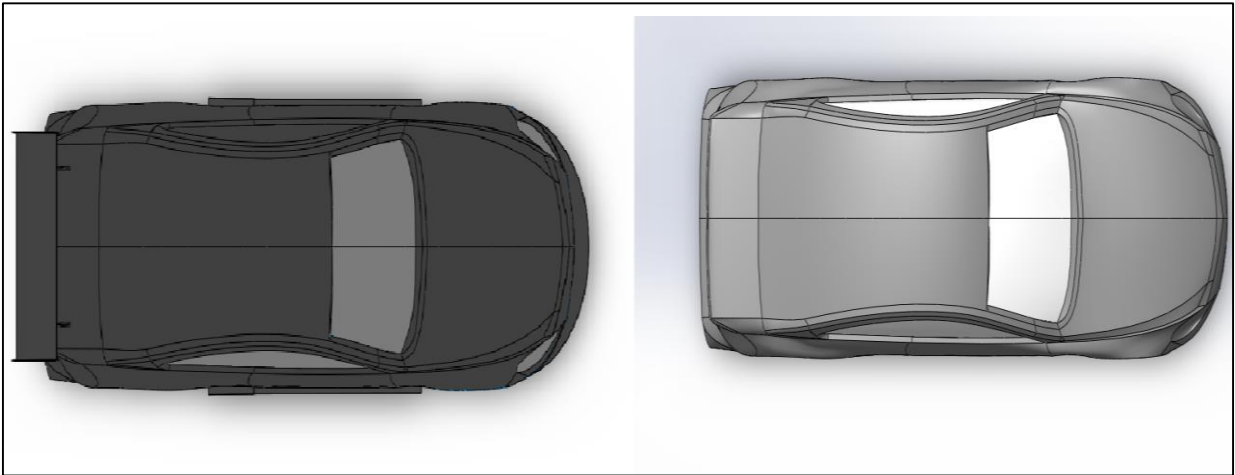
Il·lustració 96: Comparació de models : Vista lateral.

En la il·lustració 96 es mostra la vista lateral comparativa dels dos models. En aquesta imatge es pot comprovar com l'aleró posterior dona una mica més d'alçada al vehicle.



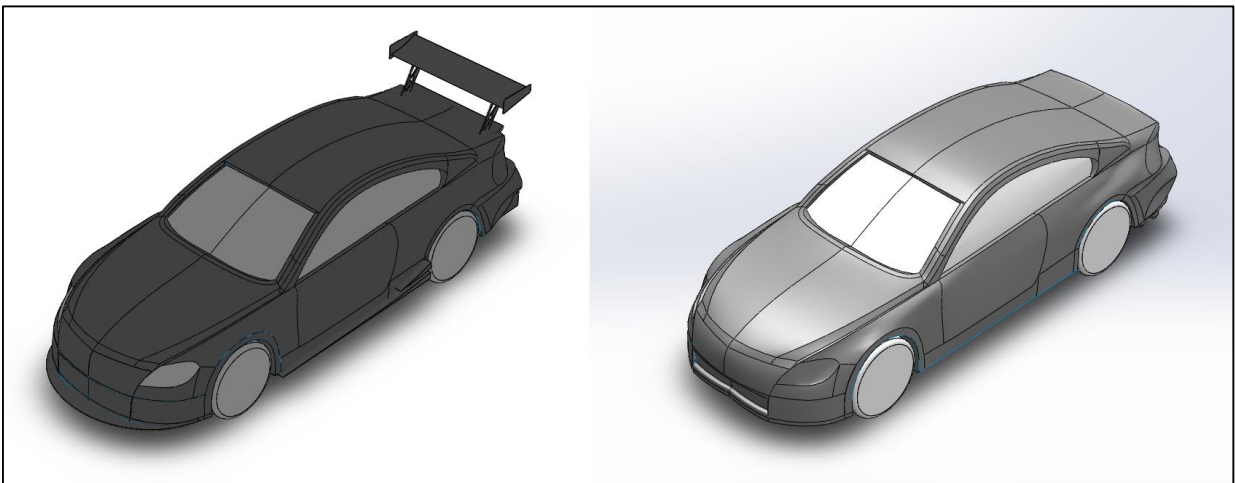
Il·lustració 97: Comparació de models : Vista frontal.

En la il·lustració 97 es mostra la vista frontal de la comparativa dels dos models. En aquesta imatge es pot apreciar clarament com el fons pla del model DTM permetrà un pas d'aire molt més fluid que el que hi haurà en el model de carrer.



Il·lustració 98: Comparació de models : Vista superior.

En la il·lustració 99 es mostra la vista superior de la comparativa dels dos models. En aquesta imatge es pot comprovar com els spoilers laterals no afegeixen pràcticament amplada al model inicial, però, que tant l'aleró posterior com el splitter frontal donen al vehicle més llargada respecte al model inicial.



Il·lustració 99: Comparació de models.

La última de les imatges comparatives ens mostra una vista amb perspectiva del dos models CAD dissenyats. A simple vista es pot intuir que l'aleró generarà bastanta càrrega aerodinàmica i que la millora de la part frontal del vehicle juntament amb el splitter reduiran el drag generat a causa de les turbulències alhora que es redirigirà el flux de forma més estable tant cap al fons del cotxe com cap a la part superior o els laterals.

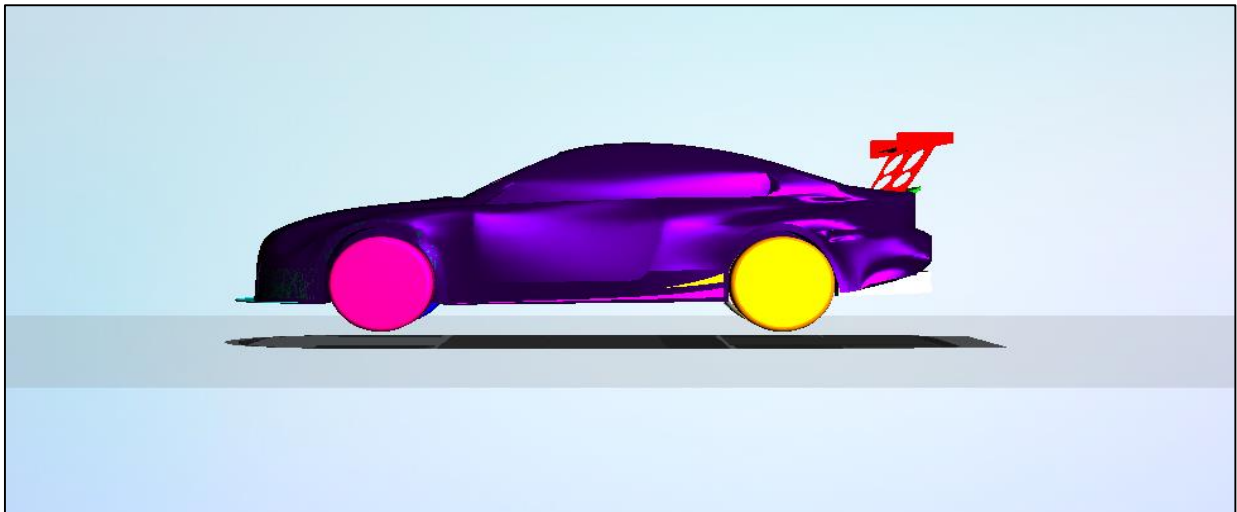
9. SIMULACIÓ DEL TURISME DE DTM

SIMULACIÓ DEL TURISME DE DTM

En aquest apartat i, per tal d'obtenir uns resultats que ens permetin comparar i analitzar adequadament les millores aerodinàmiques, es farà exactament el mateix procediment que en l'apartat **6. ESTUDI DEL TURISME DE SÈRIE**. Així doncs, s'utilitzarà el programa Flow Design d'Autodesk per tal de simular el comportament del flux d'aire a través del model CAD del BMW M6 preparat per el DTM així com les pressions que aquest genera al voltant del vehicle a diferents velocitats.

9.1. Anàlisi aerodinàmic del turisme de DTM

De la mateixa forma que en la simulació del turisme de fabricació en sèrie, el primer pas un cop afegides les modificacions es la importació del model CAD dissenyat amb el SolidWorks al simulador. Així doncs i, per tal d'evitar possibles problemes de compatibilitat, s'exporta el cos a un format d'arxiu neutral com és el IGES.



Il·lustració 100: Model DTM importat al simulador Flow Design.

Abans de procedir amb les simulacions tant de la velocitat i de la trajectòria del flux com de les pressions que es generen tant al voltant del vehicle de DTM com en la seva superfície i, de la mateixa manera que en l'apartat de la simulació del cotxe de sèrie, fixarem uns paràmetres en la velocitat de l'aire per tal de poder comparar correctament les diferències en el flux, les pressions, les velocitats, etc.

Així doncs, recordem que es realitzaran les diferents simulacions a unes velocitats de 15m/s (54km/h), 25m/s (90km/h), 50m/s (180km/h) i 80m/s (288km/h).

9.1.1. Simulació de les pressions

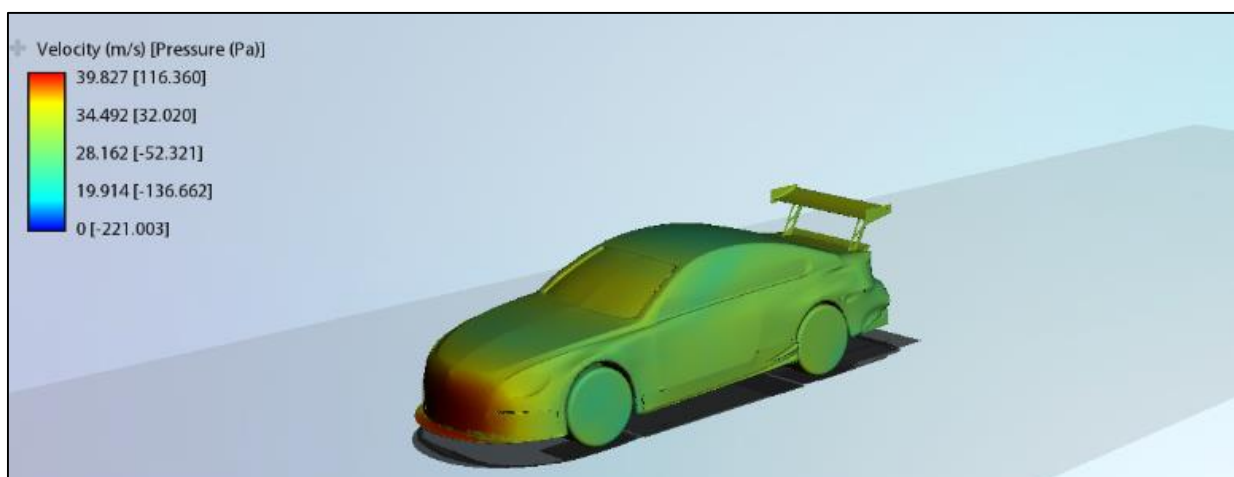
Les primeres simulacions que mostrarem son les de pressió. En aquest apartat mostrarem imatges de les simulacions de les pressions tant de l'aire com les generades en la superfície del vehicle i les comentarem puntualitzant els valor importants.

- Pressions generades per un flux d'aire a 15m/s (54km/h).



Il·lustració 101: Pressió al voltant del cotxe de DTM a 15m/s.

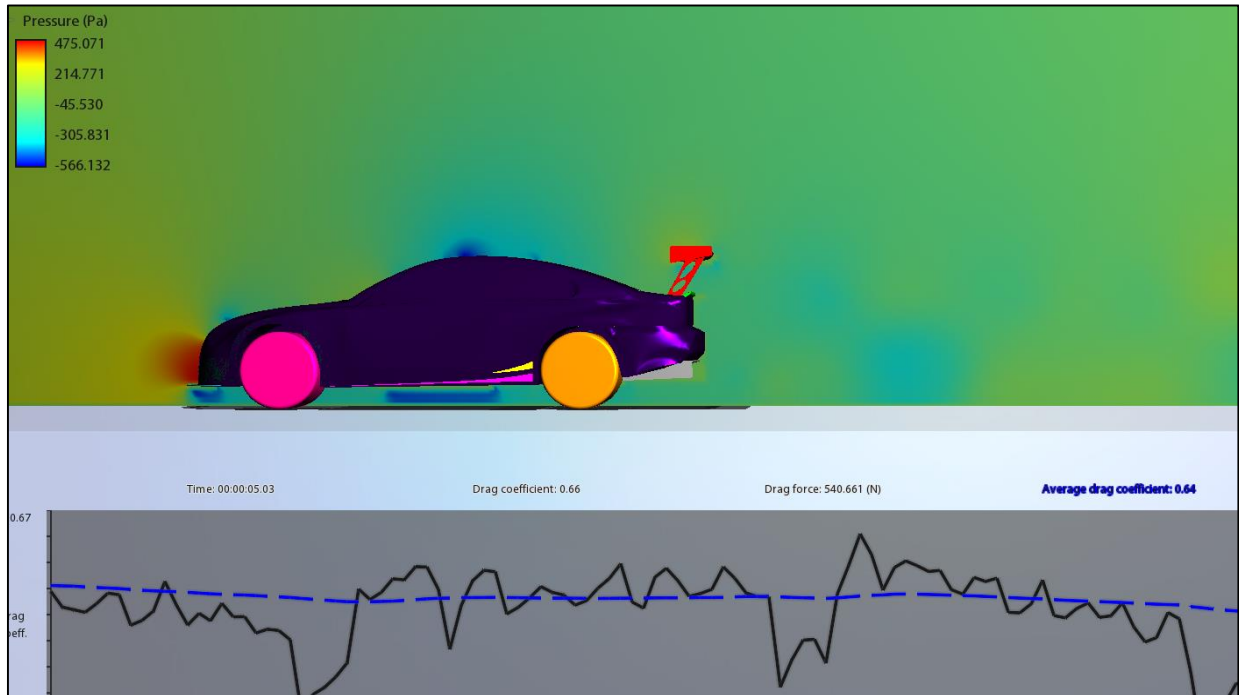
La il·lustració 101 ens mostra la primera simulació de les pressions. En aquesta es pot veure que a 15m/s el cotxe de DTM té un coeficient de Drag de 0.67 i un Drag total de 198.7N. També es pot observar una zona d'alta pressió(153.4Pa) en la part davantera del vehicle així com una zona de forta depressió en la zona del fons pla (-222.1Pa) que es manté molt constant. Una altre punt a comentar és l'aparició de pressions negatives sota l'aleró i el splitter així com un petit augment de la pressió en la zona del difusor.



Il·lustració 102: Pressió en la superfície del cotxe de DTM a 15m/s.

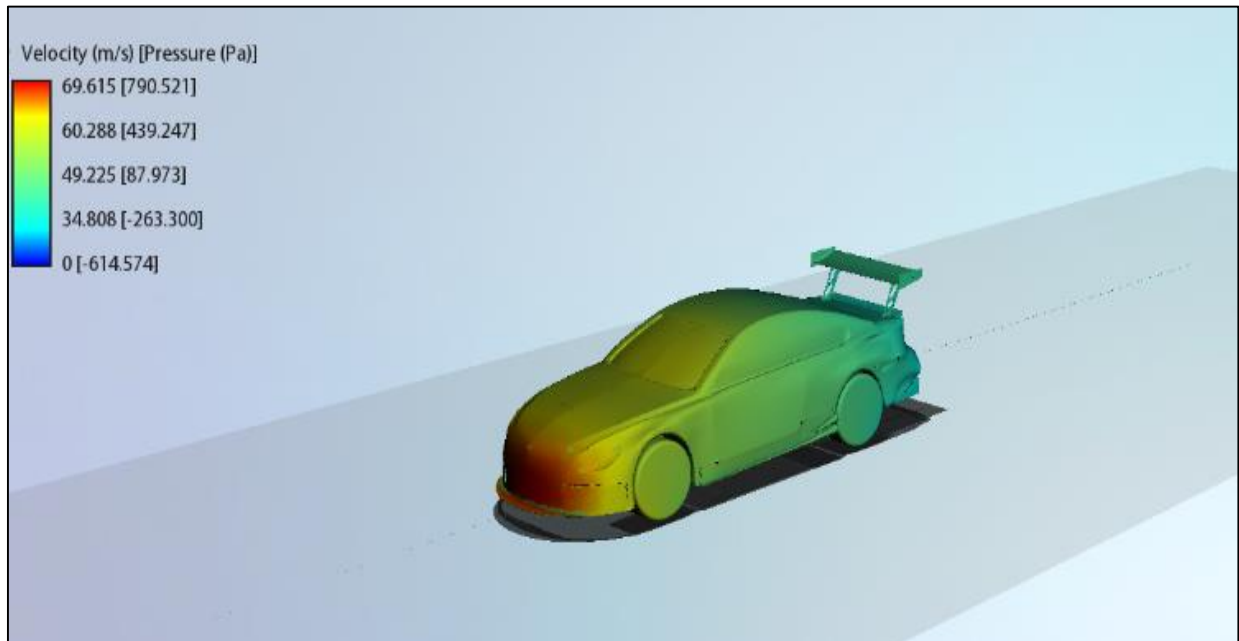
En la il·lustració 102 es poden veure les pressions que es generen en la carrosseria del cotxe a 15m/s. Es genera una pressió en la part frontal del cotxe de fins a 116.36Pa.

- Pressions generades per un flux d'aire a 25m/s (90km/h).



Il·lustració 103: Pressió al voltant del cotxe de DTM a 25m/s.

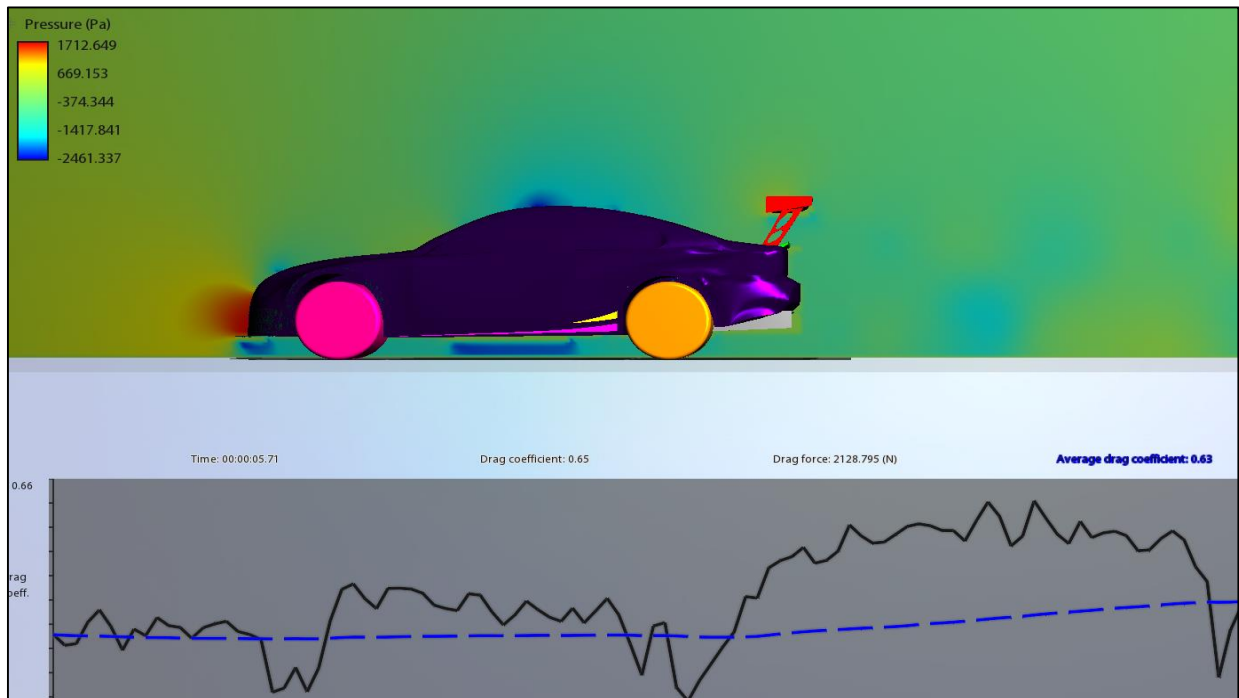
En la il·lustració 103 podem veure que a 25m/s el drag total ha augmentat fins a 540.66N. També podem observar que la pressió màxima en la part frontal del vehicle és de 475Pa mentre que la màxima depressió en el fons del vehicle ha augmentat fins als -566Pa.



Il·lustració 104: Pressió en la superfície del cotxe de DTM a 25m/s.

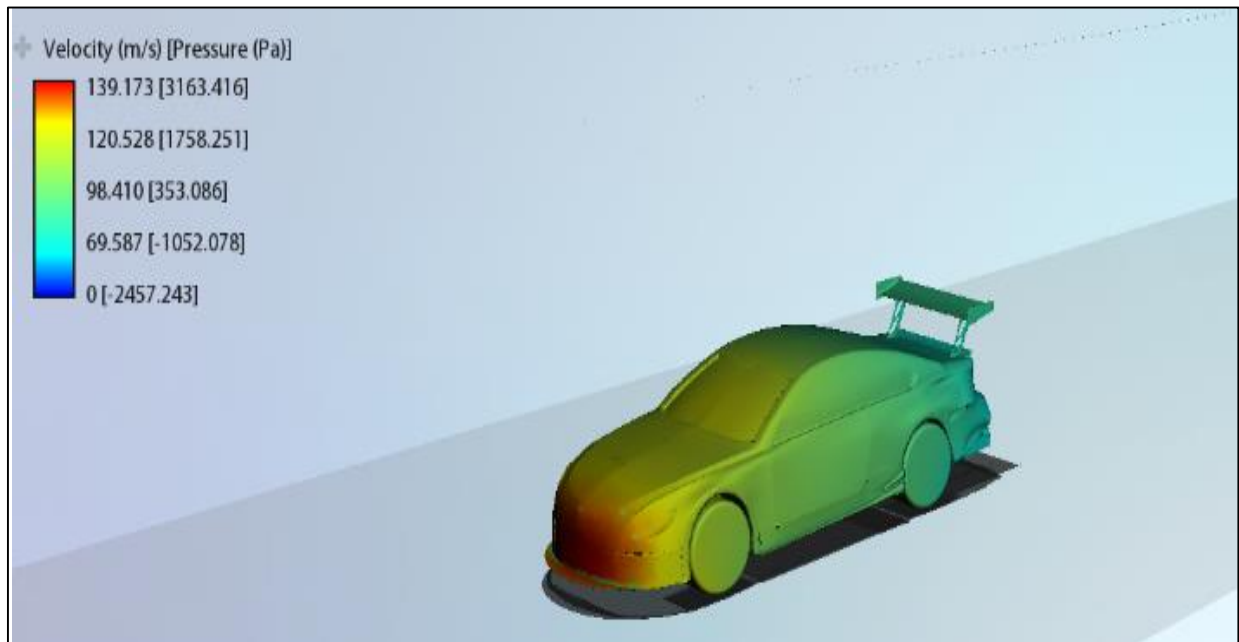
En la il·lustració 104 es poden veure les pressions que es generen en la carrosseria del cotxe a 25m/s. Es genera una pressió en la part frontal del cotxe de fins a 790.52Pa.

- Pressions generades per un flux d'aire a 50m/s (180km/h).



Il·lustració 105: Pressió al voltant del cotxe de DTM a 50m/s.

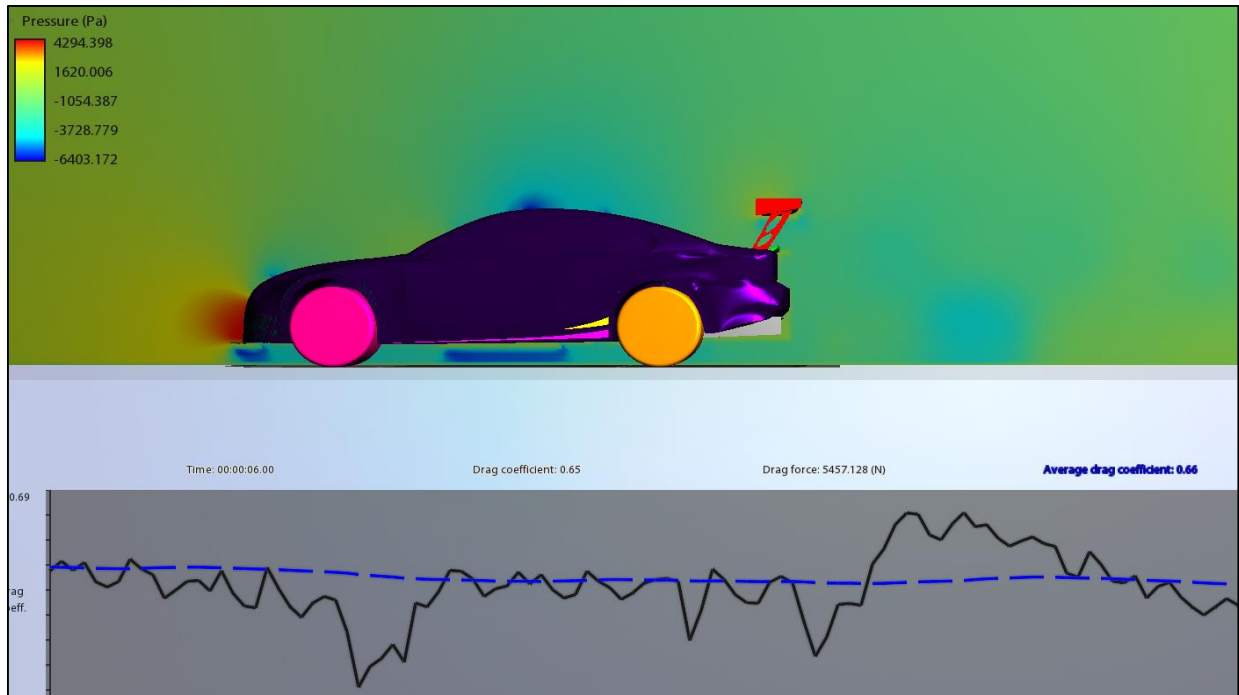
En la il·lustració 105 podem veure que a 50m/s el drag total ha augmentat fins a 2126.79N. També podem observar que la pressió màxima en la part frontal del vehicle és de 1712Pa mentre que la màxima depressió en el fons del vehicle ha augmentat fins als -2461Pa.



Il·lustració 106: Pressió en la superfície del cotxe de DTM a 50m/s.

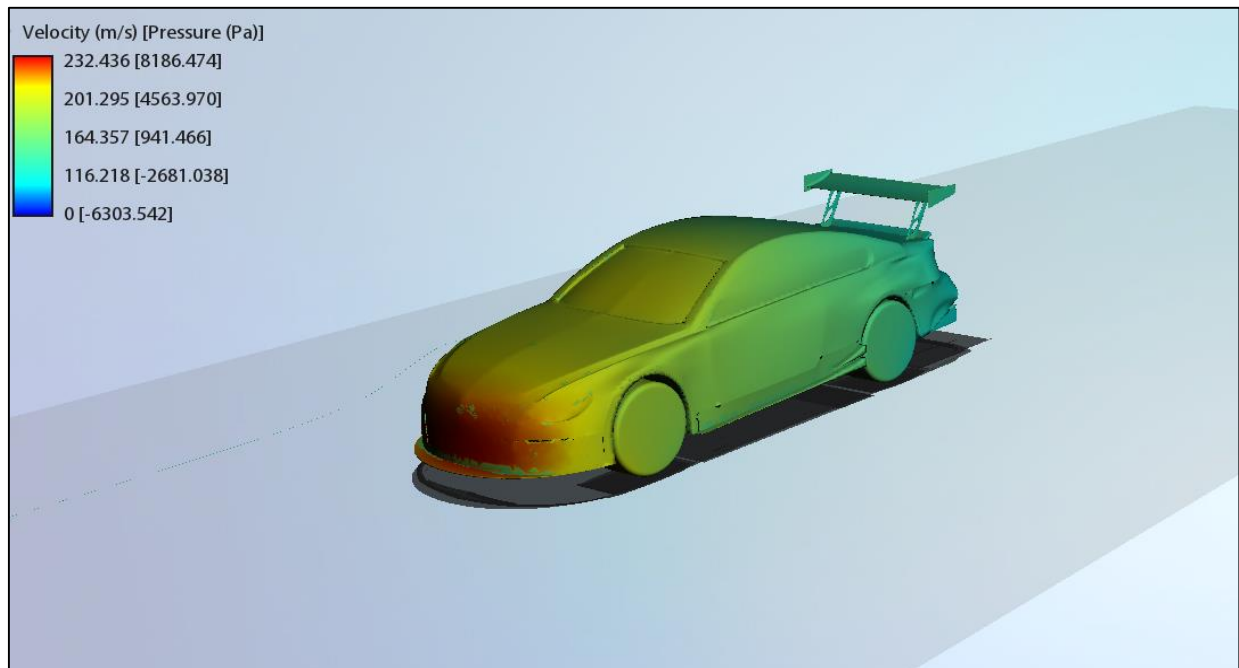
En la il·lustració 106 es poden veure les pressions que es generen en la carrosseria del cotxe a 50m/s. Es genera una pressió en la part frontal del cotxe de fins a 3163.42Pa.

- Pressions generades per un flux d'aire a 80m/s (288km/h).



Il·lustració 107: Pressió al voltant del cotxe de DTM a 80m/s.

En la il·lustració 107 podem veure que a 80m/s el drag total ha augmentat fins a 5457.12N. També podem observar que la pressió màxima en la part frontal del vehicle és de 4294Pa mentre que la màxima depressió en el fons del vehicle ha augmentat fins als -6403Pa.



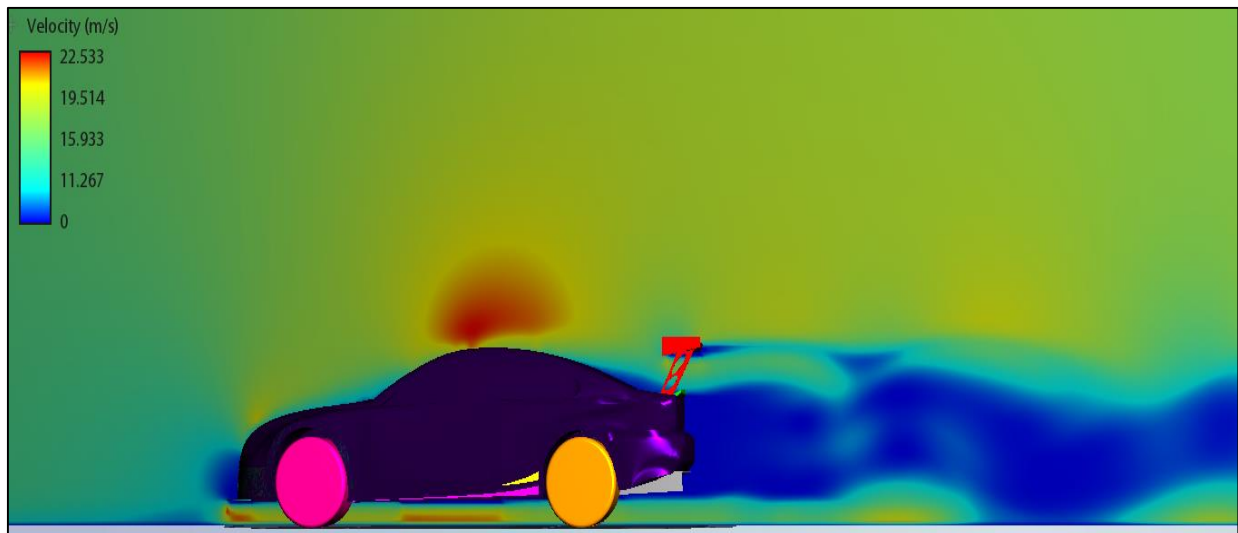
Il·lustració 108: Pressió en la superfície del cotxe de DTM a 80m/s.

En la il·lustració 108 es poden veure les pressions que es generen en la carrosseria del cotxe a 80m/s. Es genera una pressió en la part frontal del cotxe de fins a 8186.47Pa.

9.1.2. Simulació de les velocitats

En aquest apartat mostrarem les simulacions de la velocitat de l'aire a través del vehicle. Igual que hem fet amb la simulació de les pressions comentarem breument cadascun dels resultats que han anat sortint en la simulació de les diferents velocitats del flux.

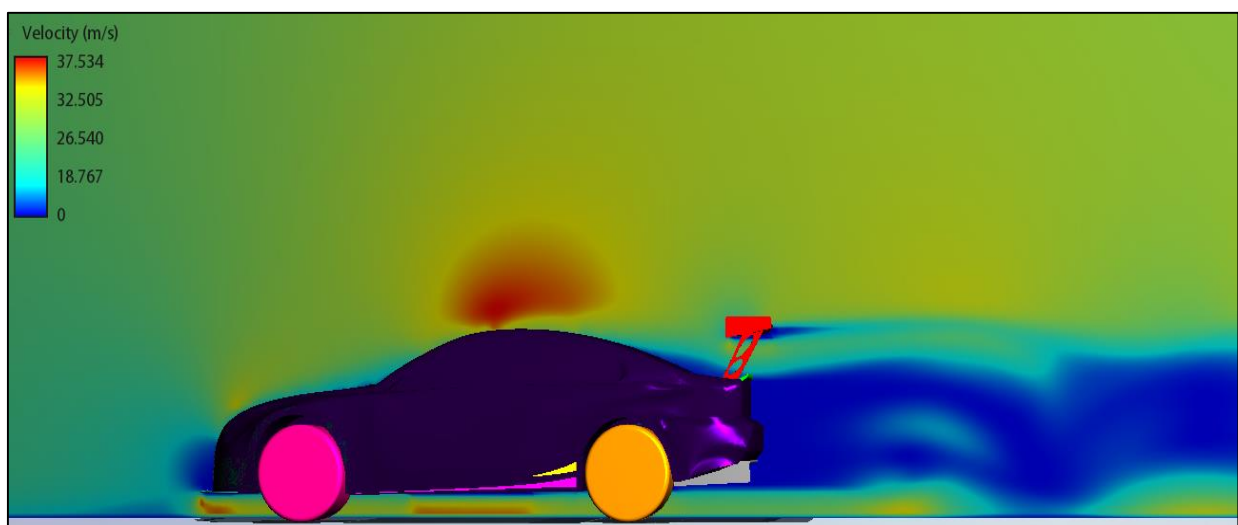
- **Velocitats d'un flux d'aire a 15m/s (54km/h) al voltant del vehicle.**



Il·lustració 109: Velocitat del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 15m/s.

La il·lustració 109 ens mostra la primera simulació de la velocitat del flux al voltant del cotxe del DTM. En aquesta imatge es pot veure que partint d'una velocitat inicial 15m/s, el flux s'accelera fins als 22.5m/s en la zona del fons del cotxe degut a la disminució de la secció disponible generant una zona de depressió molt estable a través del fons pla.

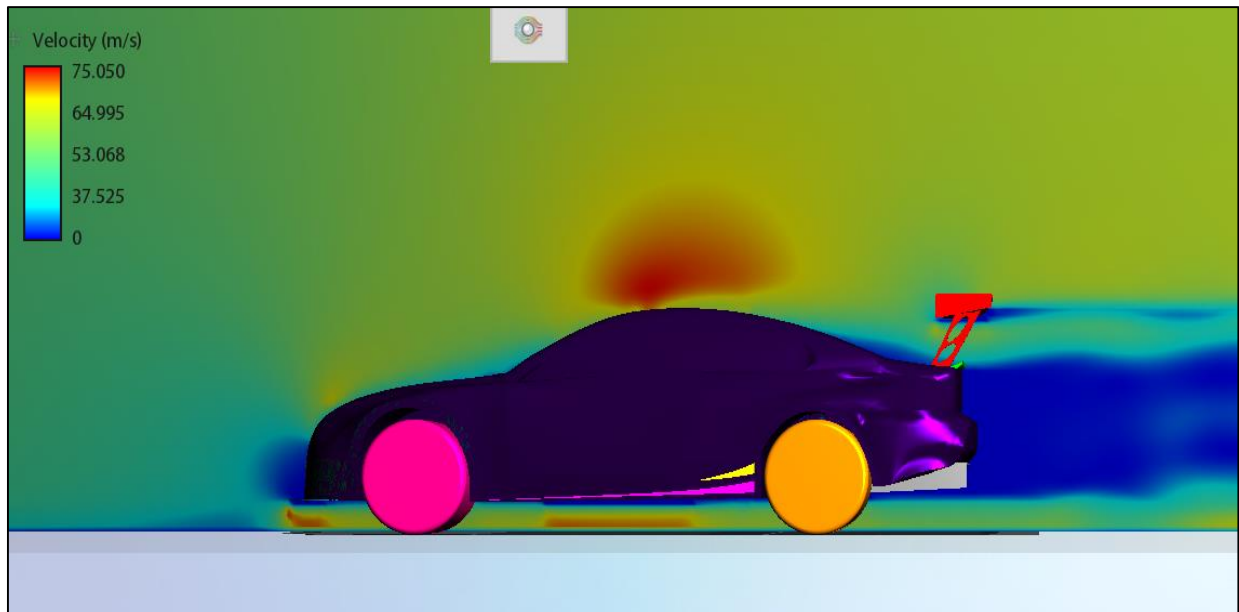
- **Velocitats d'un flux d'aire a 25m/s (90km/h) al voltant del vehicle.**



Il·lustració 110: Velocitat del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 25m/s.

La il·lustració 110 mostra la velocitat del flux al voltant del cotxe partint d'una velocitat inicial de 25m/s. Es pot observar com el fons pla el flux s'accelera fins als 37.53m/s.

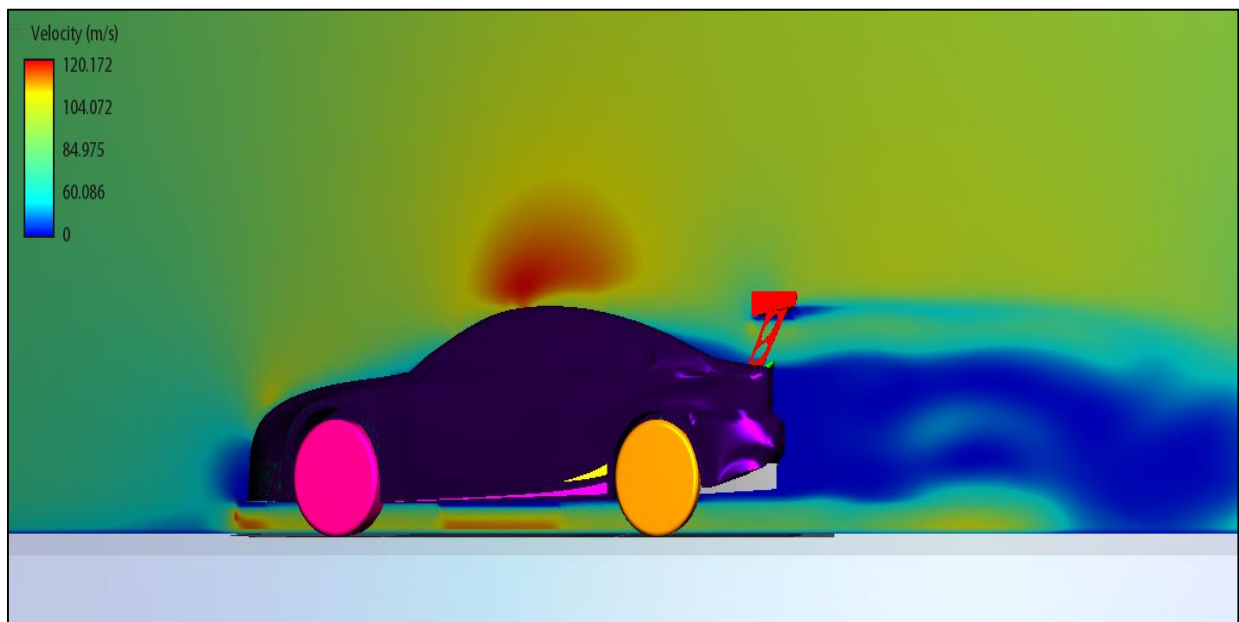
- Velocitats d' un flux d'aire a 50m/s (180km/h) al voltant del vehicle.



Il·lustració 111: Velocitat del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 50m/s.

La il·lustració 111 mostra la velocitat del flux al voltant del cotxe partint d'una velocitat inicial de 50m/s. Es pot observar com el fons pla el flux s'accelera fins als 75.05m/s.

- Velocitats d' un flux d'aire a 80m/s (288km/h) al voltant del vehicle.



Il·lustració 112: Velocitat del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 80m/s.

La il·lustració 112 mostra la velocitat del flux al voltant del cotxe partint d'una velocitat inicial de 80m/s. Es pot observar com el fons pla el flux s'accelera fins als 120.172m/s.

9.1.3. Simulació vectorial

En aquest apartat mostrarem les simulacions de la velocitat de l'aire a través del vehicle mitjançant vectors o línies de flux. Com ja hem dit en l'apartat de la simulació del cotxe de sèrie, aquest simulador ens permet visualitzar la direcció de les línies de flux de diverses formes: amb vectors, amb línies, amb tubs, amb partícules, etc.

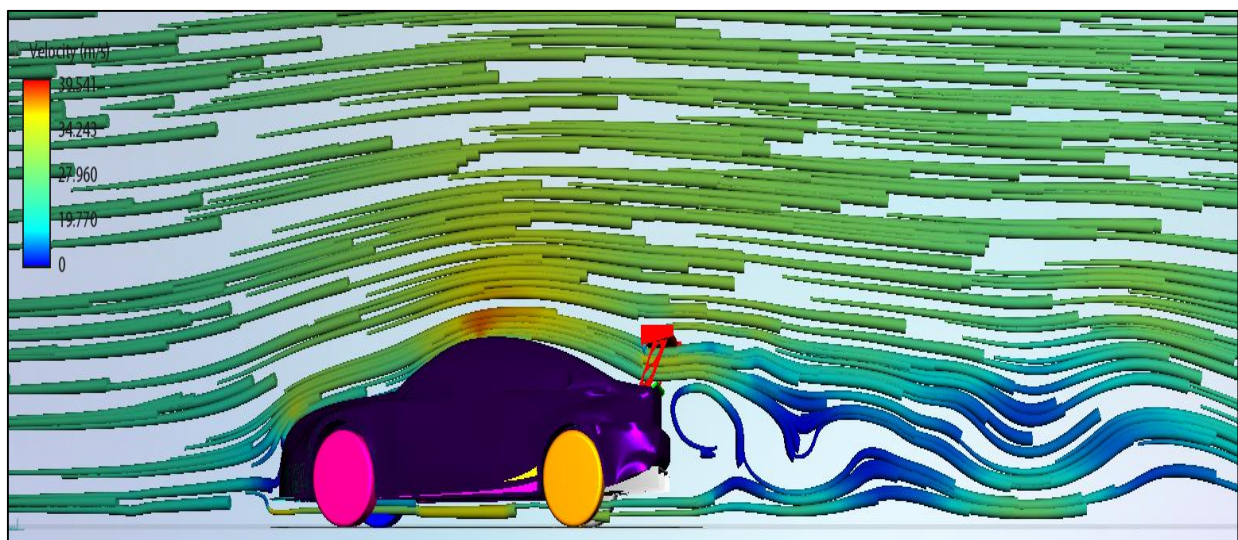
- **Trajectòria del flux d'aire a 15m/s (5km/h) al voltant del vehicle.**



Il·lustració 113: Trajectòria del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 15m/s.

La il·lustració 113 ens mostra la simulació de la direcció del flux, el qual compta amb una velocitat inicial de 15m/s, al voltant del cotxe mitjançant una simulació amb línies.

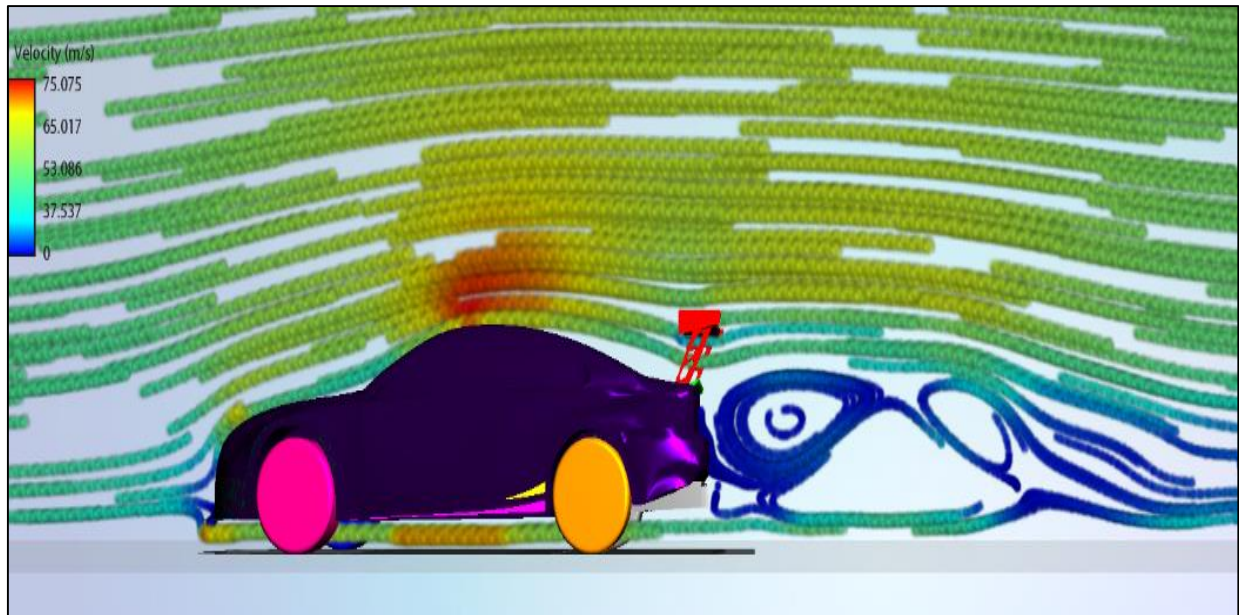
- **Trajectòria del flux d'aire a 25m/s (90km/h) al voltant del vehicle.**



Il·lustració 114: Trajectòria del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 25m/s.

La il·lustració 114 ens mostra la simulació de la direcció del flux, el qual compta amb una velocitat inicial de 25m/s, al voltant del cotxe mitjançant una simulació amb tubs.

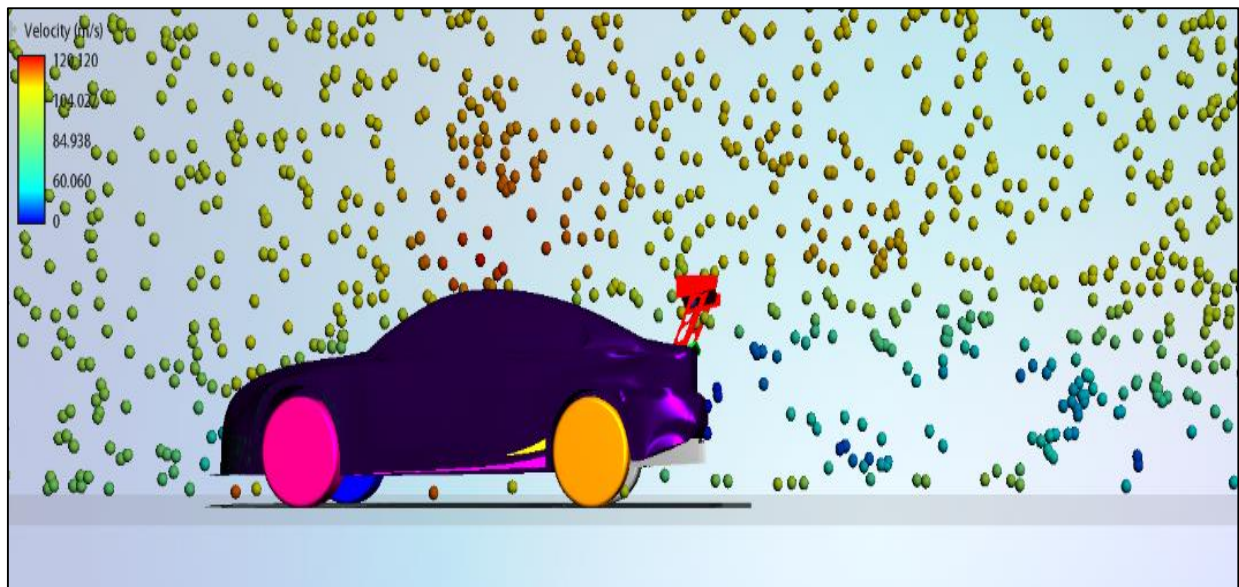
- Trajectòria del flux d'aire a 50m/s (180km/h) al voltant del vehicle.



Il·lustració 115: Trajectòria del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 50m/s.

La il·lustració 115 ens mostra la simulació de la direcció del flux, el qual compta amb una velocitat inicial de 50m/s, al voltant del cotxe mitjançant una simulació amb gas.

- Trajectòria del flux d'aire a 80m/s (288km/h) al voltant del vehicle.



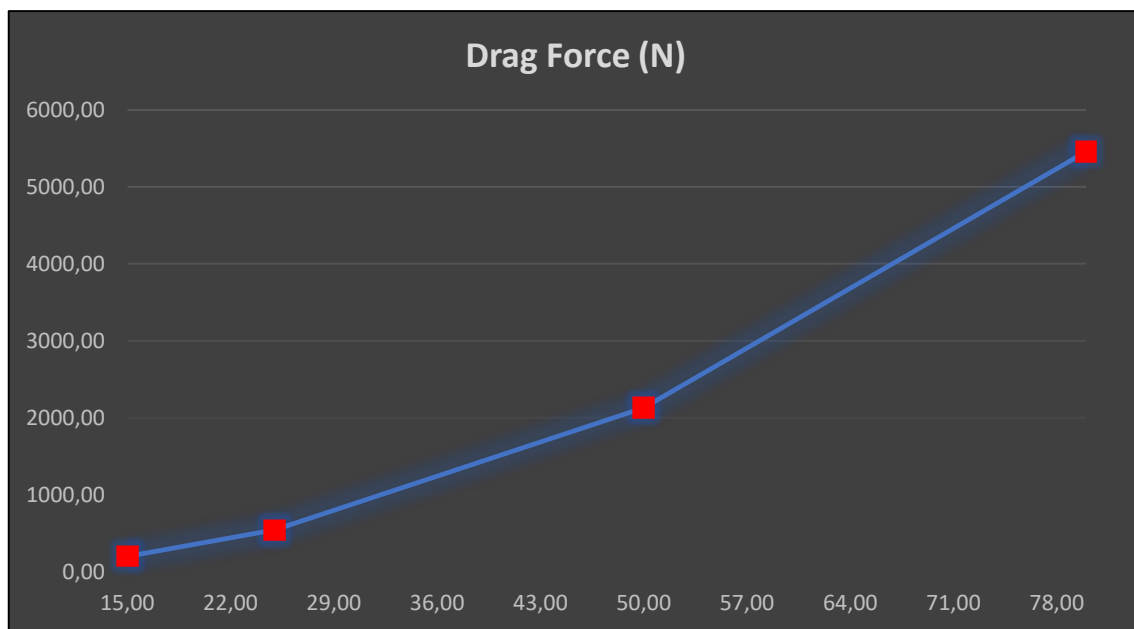
Il·lustració 116: Trajectòria del flux d'aire a través del cotxe de sèrie a 80m/s.

La il·lustració 116 ens mostra la simulació de la direcció del flux, el qual compta amb una velocitat inicial de 80m/s, al voltant del cotxe mitjançant una simulació amb partícules.

9.2. Resum de resultats del anàlisi CFD

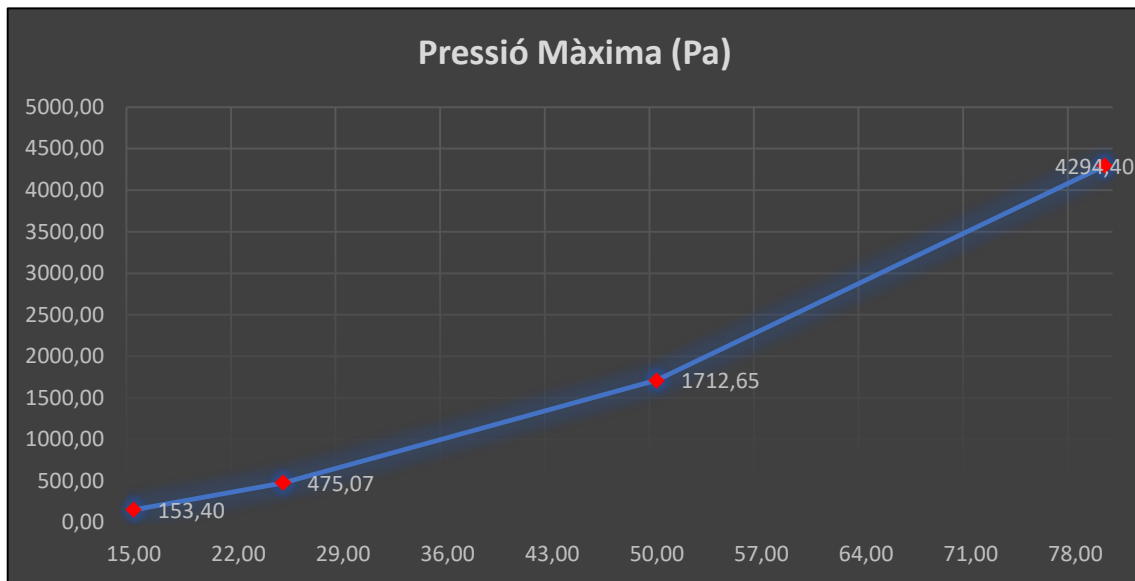
Tal i com es va fer en l'apartat 6.2, a continuació es mostrarà un petit resum mitjançant una taula de dades i una posterior explicació amb l'ajuda de alguns gràfics dels diversos resultats que s'han anat obtenint al llarg de les simulacions tant de velocitat com de pressions en totes les condicions de velocitats de flux a través de la carrosseria del cotxe.

	Drag cf.	Drag Force (N)	Pressió (Pa)		Velocitat màx. (m/s)
			Pres. Màx.	Pres. Min	
15m/s	0.67	198.75 N	153.40 Pa	-222.14 Pa	22.53 m/s
25m/s	0.66	540.66 N	474.07 Pa	-566.13 Pa	37.53 m/s
50m/s	0.65	2128.79 N	1712.65 Pa	-2461.37 Pa	75.05 m/s
80m/s	0.65	5457.13 N	4294.40 Pa	-6403.17 Pa	120.17 m/s



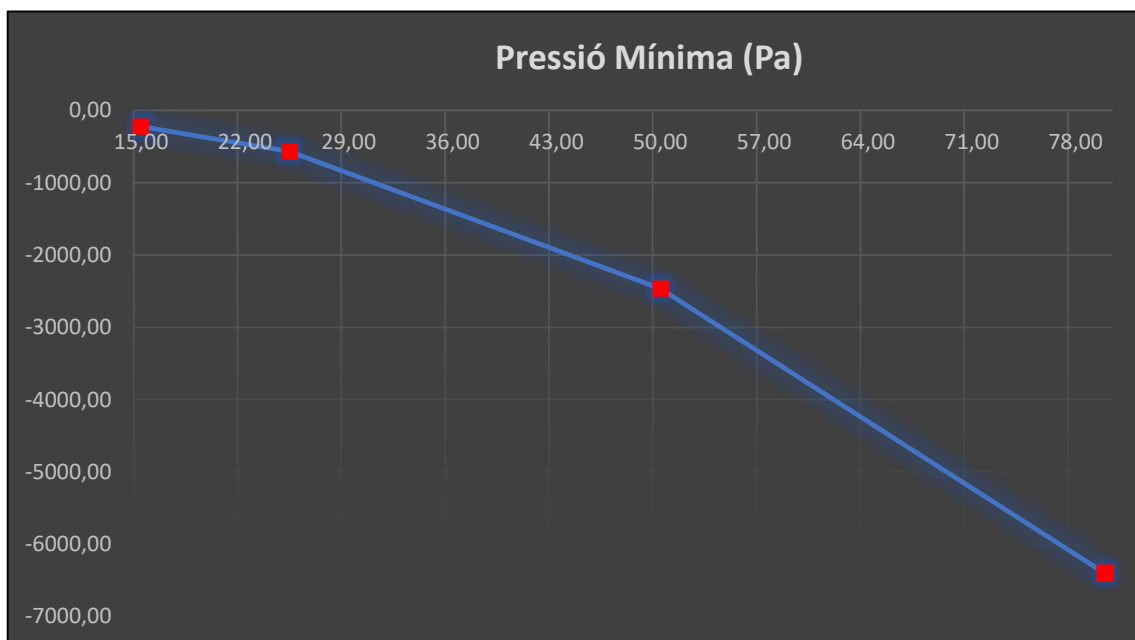
Il·lustració 117: Gràfica de la força total del Drag en el BMW DTM.

La il·lustració 117 conté una gràfica que ens mostra l'evolució de la força total generada per el Drag que s'ocasiona a causa del contacte de l'aire amb la superfície del BMW DTM. De la mateixa forma que passava amb el cotxe de sèrie, es pot veure clarament com a mesura que augmenta la velocitat del vehicle, la resistència aerodinàmica que aquest haurà de vèncer augmenta de forma exponencial.



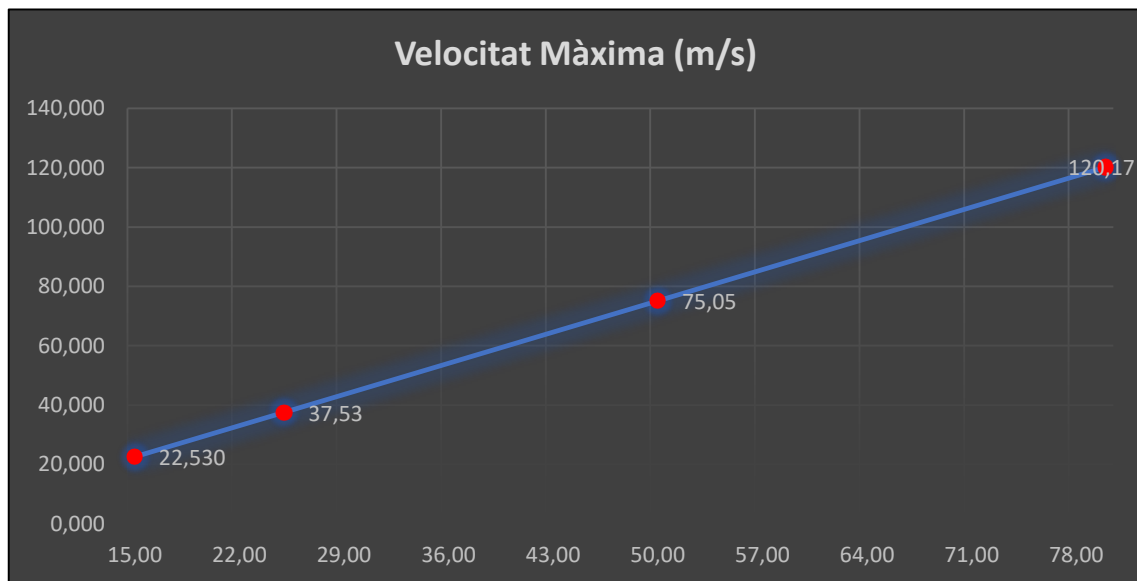
Il·lustració 118: Gràfica de la pressió màxima en el BMW DTM.

En la il·lustració 118 es pot observar una gràfica que ens mostra l'evolució de la pressió màxima generada en la part frontal del vehicle en les diferents simulacions. Igual que passava amb la gràfica del Drag es pot veure clarament com a mesura que augmenta la velocitat del vehicle, la pressió màxima augmenta de forma exponencial.



Il·lustració 119: Gràfica de la pressió mínima en el BMW DTM.

En la il·lustració 119 es pot observar la gràfica que ens mostra l'evolució de la depressió màxima generada en la zona del fons del vehicle al llarg de les diferents simulacions realitzades. En aquest cas també obtenim un increment exponencial de la depressió màxima que es genera a mesura que s'augmenta la velocitat.



Il·lustració 120: Gràfica de la velocitat màxima del flux en el BMW DTM.

En la il·lustració 120 es pot observar la gràfica que ens mostra l'evolució de la velocitat màxima del flux al llarg de les diferents simulacions realitzades. En aquest cas obtenim un increment lineal de la velocitat màxima que de l'aire respecte a la seva velocitat inicial. Cal destacar que aquesta velocitat es genera en el fons del vehicle.

Observant aquests gràfics es pot arribar a les mateixes conclusions que vam treure de la simulació del cotxe de sèrie:

- La Pressió màxima s'incrementa exponencialment a mesura que augmenta la velocitat.
- La depressió màxima també s'incrementa exponencialment a mesura que augmenta la velocitat.
- La velocitat màxima de l'aire augmenta de forma proporcional a la velocitat inicial del flux.
- Tal i com explica l'efecte Bernoulli s'observa que a major velocitat màxima del flux que circula per el fons del vehicle, major depressió es genera.
- Com era d'esperar el coeficient de Drag no depèn de la velocitat i, per tant, s'ha mantingut molt constant en valors de 0.65 a 0.67 al llarg de totes les simulacions.

10. ANÀLISIS DELS RESULTATS

ANÀLISIS DELS RESULTATS

Un cop s'han obtingut, ordenat i representat els valors de les pressions i les velocitats de l'aire mostrats en les simulacions tant del cotxe de sèrie com del cotxe del DTM, arriba el moment de comparar i analitzar totes aquestes dades per tal de veure quina influència han tingut les millores aerodinàmiques implementades en el vehicle inicial.

10.1. Comparació dels resultats

El primer pas a realitzar abans de començar amb l'anàlisi serà la realització d'una sèrie de comparacions de tots els valors obtinguts en les dues simulacions per mitjà d'una taula en primera instància i amb la utilització d'unes gràfiques posteriorment.

	Drag cf.		Drag Force (N)		Pressió (Pa)				Velocitat màx. (m/s)	
					Pres. Màx.		Pres. Min			
	sèrie	DTM	sèrie	DTM	sèrie	DTM	sèrie	DTM	sèrie	DTM
15m/s	0.36	0.67	113.6	198.8	139.5	153.4	-307.2	-222.1	24.3	22.53
25m/s	0.36	0.66	323.4	540.7	435.3	475.1	-824.6	-566.1	40.5	37.53
50m/s	0.36	0.65	1250.4	2128.8	1556.2	1712.6	-3459.8	-2461.3	86.1	75.05
80m/s	0.36	0.65	3266.6	5457.1	4087.9	4294.4	-8676.9	-6403.17	132.2	120.17

A primera vista podem observar una sèrie de diferències que comentarem a continuació:

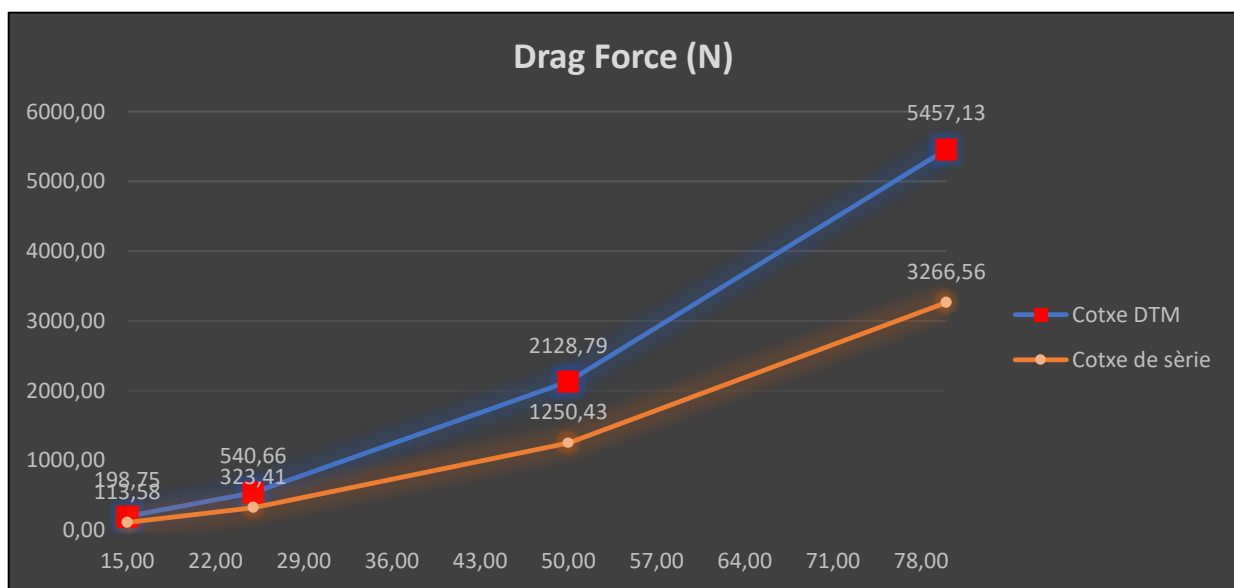
- Augment considerable del coeficient de Drag.
- Augment de la força de Drag total.
- Augment de la pressió màxima del flux d'aire.
- Disminució de la depressió del flux d'aire.
- Disminució de la velocitat màxima del flux.

Cal comentar que algunes de les observacions realitzades com la de la disminució de la depressió o de la velocitat màxima de l'aire semblen contradictòries amb la introducció d'elements com el splitter i el fons pla, però tenen una explicació raonable que comentarem més endavant al mostrar les gràfiques comparatives.

10.2. Comparació dels rendiments

En aquest apartat realitzarem una comparació mitjançant gràfiques i una posterior explicació de les variacions dels valors obtinguts en les simulacions abans i després d'introduir les modificacions típiques dels vehicles de DTM en el nostre turisme de fabricació en sèrie. Els valors a comparar seran el Drag total, les pressions màximes i de les pressions mínimes del flux d'aire.

10.2.1. Comparació de la força del Drag



Il·lustració 121: Gràfica comparativa de la força total del Drag.

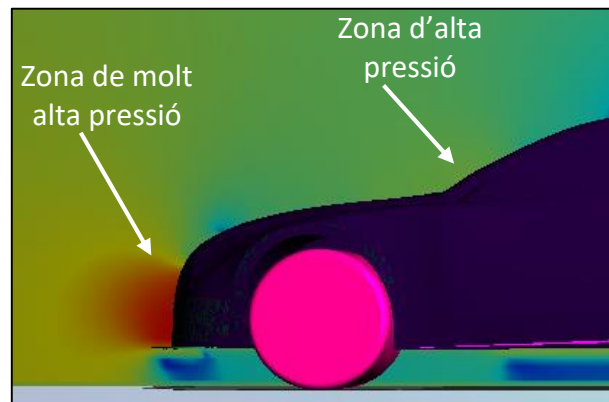
En aquesta gràfica es pot observar un clar augment de la resistència aerodinàmica que el vehicle ha de vèncer degut al Drag que generen els diversos apèndixs instal·lats.

L'augment del coeficient de Drag entre el vehicle de sèrie i el vehicle amb les millores aerodinàmiques implementades és d'aproximadament el 80% mentre que, tal i com es veu en la taula que hi ha a continuació, el valor del drag total ha patit un increment d'entre el 67% i el 75% en funció de la velocitat del flux.

15m/s	25m/s	50m/s	80m/s
+75%	+67%	+70%	+67%

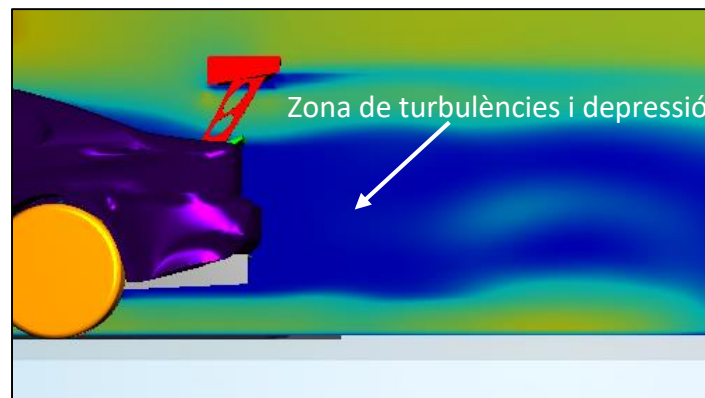
Aquest augment del 70% en la resistència aerodinàmica que generen els diferents components aerodinàmics és la principal explicació de perquè el seu ús no és viable en vehicles de carrer, a excepció d'alguns cotxes de gran cilindrada, i és que per tal que un increment tant gran en la resistència sigui viable es necessaria un motor de gran potència i unes condicions d'ús que requereixin una gran càrrega aerodinàmica.

A continuació es mostraran les zones del vehicle on més resistència aerodinàmica es genera i s'explicarà quina influència hi tenen els elements aerodinàmics estudiats.



Il·lustració 122: Zones d'alta pressió en el frontal del cotxe.

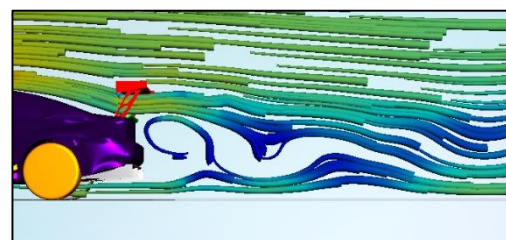
La part frontal del vehicle és la zona on més resistència a l'avanç es genera. Això és en part per la forma dels vehicles que propicia un "impacte" de l'aire amb el morro del cotxe frenant l'aire i generant una zona de molt alta pressió tal i com es pot observar en la il·lustració 122. Una altra zona d'alta pressió es la part del vidre frontal, on l'aire també impacta frontalment.



Il·lustració 123: Zones de depressió en l'estela del cotxe.

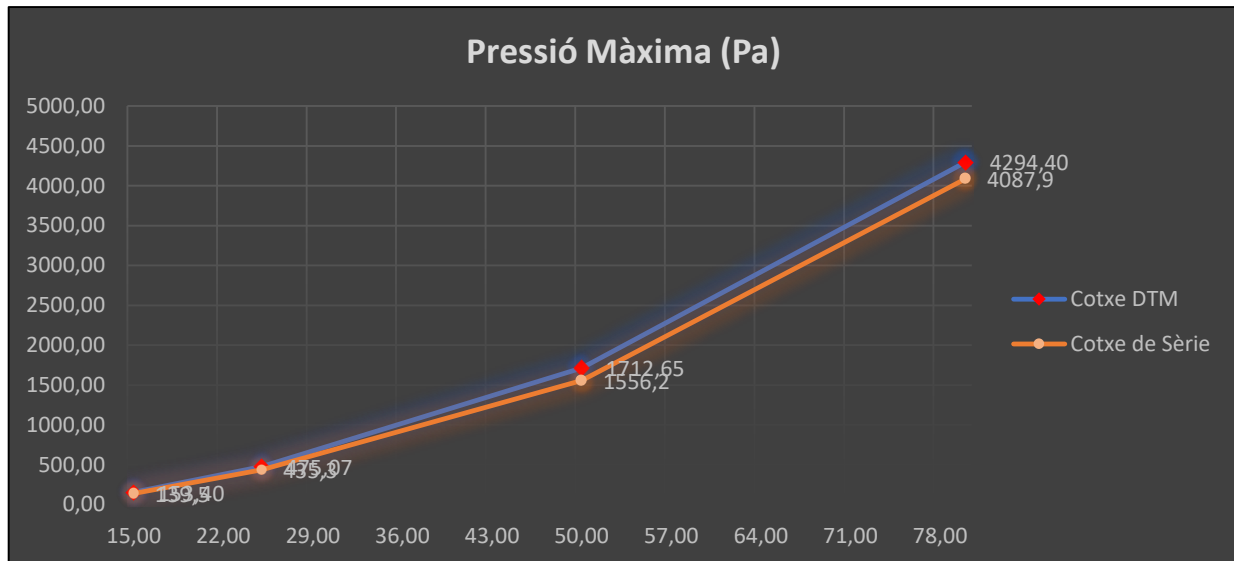
L'altra zona del cotxe on es produeix una gran quantitat de resistència a l'avanç és en l'estela del cotxe. A diferència del que passa en la part frontal del vehicle, en l'estela el Drag es generat a causa del buit que apareix en aquesta zona així com de les turbulències que es produeixen quan l'aire que circula a alta velocitat tant pel sostre com pel fons pla "omplen" aquest espai de baixa velocitat.

També cal comentar que l'aleró produeix una zona d'alta pressió en la secció superior del perfil i una zona de depressió en la part inferior, tal i com es pot observar en la il·lustració 124.



Il·lustració 124: Turbulències en l'estela del cotxe.

10.2.2. Comparació de la Pressió Màxima



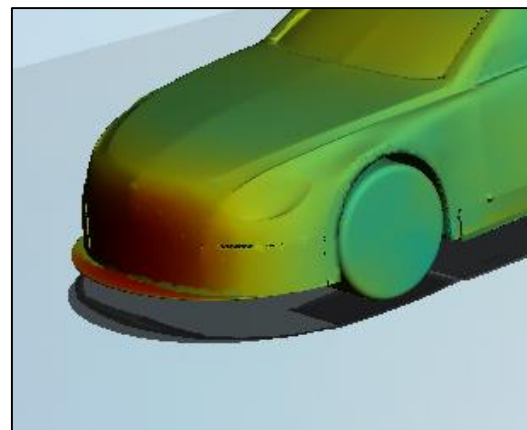
Il·lustració 125: Gràfica comparativa de la pressió màxima.

Tal i com es pot observar en la il·lustració 125 i en la taula que mostrarem a continuació, gairebé no s'ha produït cap augment en la Pressió Màxima entre els turisme de producció en sèrie i el preparat per la competició.

15m/s	25m/s	50m/s	80m/s
+10%	+9%	+10%	+5%

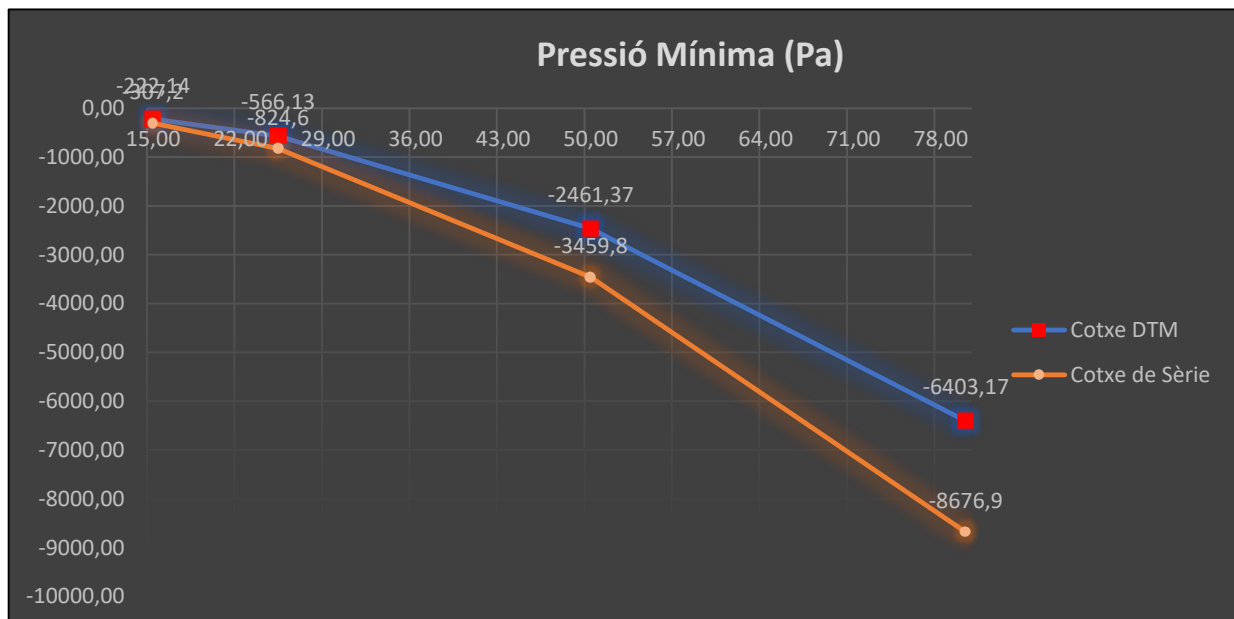
El fet que la diferència entre la Pressió Màxima en el turisme de fabricació en sèrie i el de competició sigui tant baixa es degut a que aquesta pressió la trobem en la part vertical del para-xocs frontal de qualsevol vehicle. Aquesta zona no es pot modificar gaire degut a que és l'entrada principal d'aire cap als refrigeradors i cap al motor.

Tot i això tenim un lleuger augment d'entre el 5% i el 10% causat pel splitter, el qual no deixa que l'aire que xoca amb el morro del cotxe marxi cap al fons pla. Tot i que aquest element augmenta la pressió en aquesta zona, s'ha de tindre en compte que aquesta zona és alhora més controlada i evita que el flux turbulent es dirigeixi cap a la zona del fons del vehicle evitant així possibles pressions positives en el terra que podrien arribar a generar sustentació i, per tant, pèrdua de tracció i càrrega aerodinàmica.



Il·lustració 126: Zona d'alta pressió frontal.

10.2.3. Comparació de la Pressió Mínima



Il·lustració 127: Gràfica comparativa de la pressió mínima.

En la il·lustració 127 així com en la taula que mostrarem a continuació, s'observa una disminució de la depressió màxima entre els turisme de producció en sèrie i el preparat per la competició. Aquest fet pot causar confusió ja que teòricament amb la instal·lació del splitter, el fons pla i el difusor, el flux d'aire que circula pel fons del cotxe ho hauria de fer de forma més fluida i ràpida generant una major depressió. No obstant això, aquesta disminució té una explicació.

15m/s	25m/s	50m/s	80m/s
-28%	-31%	-29%	-26%

Tal com es mostra en la il·lustració 128 i 129, el pic de depressió obtingut en el vehicle de fabricació en sèrie es causat per un augment puntual de la velocitat del flux al xocar amb algunes de les protrusions. No obstant això, es pot observar clarament com la pressió al llarg del fons és molt irregular arribant a trobar inclús zones de pressió positiva en la part frontal del fons pla.



Il·lustració 128: Pic de velocitat en el fons del vehicle.



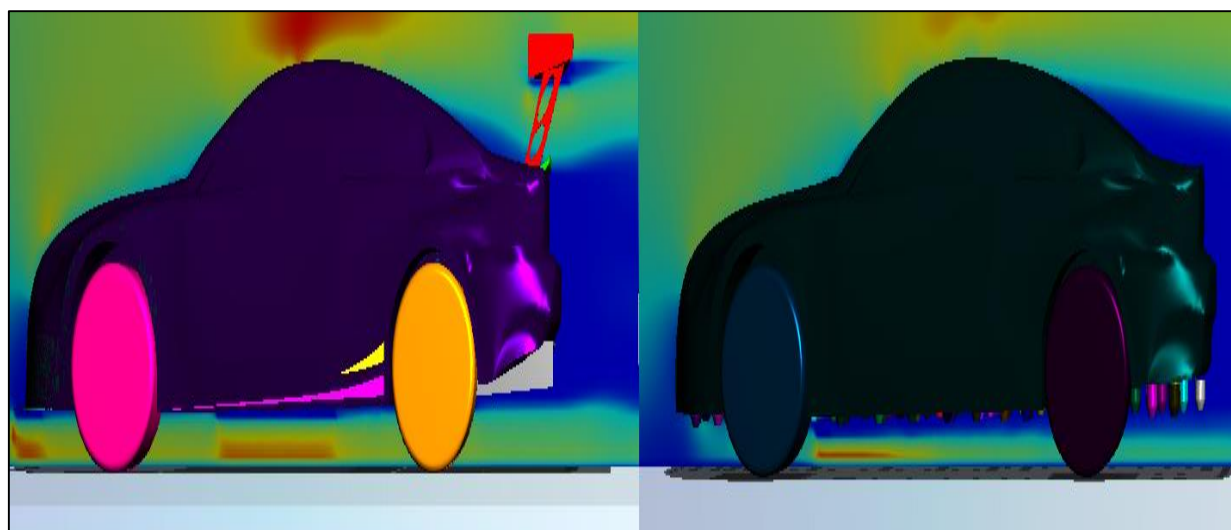
Il·lustració 129: Pic de depressió en el fons del vehicle.

A continuació es mostrarà una taula amb l'augment percentual de la velocitat màxima del flux d'aire en la zona del fons del cotxe entre els dos models CAD simulats i unes imatges comparatives tant de les velocitats com de les pressions que es generen el fons del turisme tant de fabricació en sèrie com del DTM.

15m/s	25m/s	50m/s	80m/s
-9%	-9%	-12%	-9%

En la taula mostrada s'aprecia com el flux d'aire que circula a través de la secció del terra del turisme preparat per el DTM ha patit una lleugera disminució d'entre el 9% i el 12% de la velocitat respecte al flux que circula a través del cotxe de fabricació en sèrie. Com ja s'ha comentat abans, això es degut al xoc del flux d'aire amb les protrusions que es van afegir per simular les imperfeccions en el fons d'un vehicle.

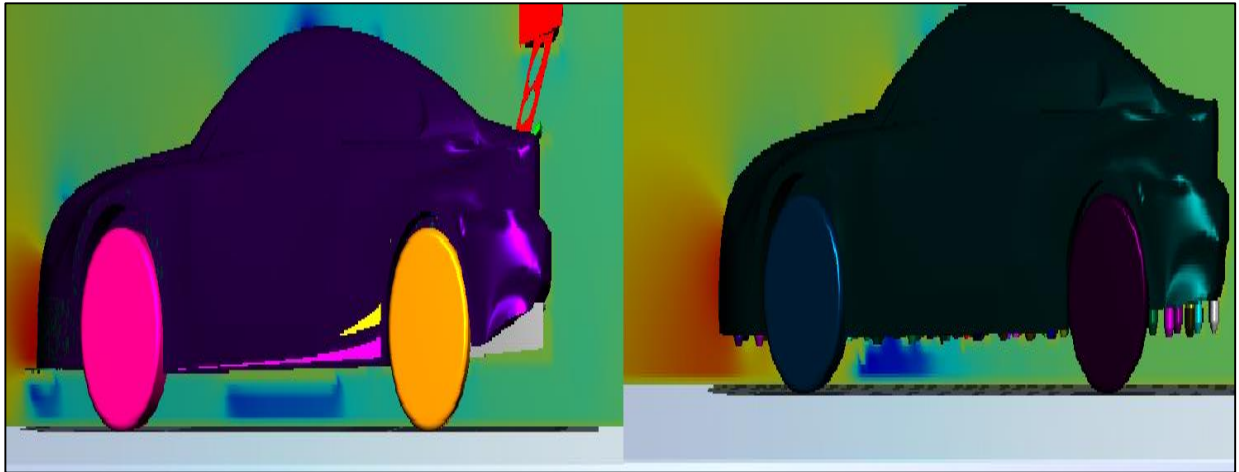
Per tal de demostrar i entendre les millores en la càrrega aerodinàmica o downforce que genera el fons pla juntament amb els elements que en milloren el seu rendiment com son el splitter o el difusor, a continuació es mostrarà la comparació de velocitats.



Il·lustració 130: Comparació de les velocitats en el fons dels vehicles.

Tal i com es pot observar en la il·lustració 130 i en la taula que hem presentat anteriorment, el pic màxim de la velocitat del flux a través del terra del turisme de sèrie (dreta) és més elevat que el que es produeix en el vehicle del DTM. No obstant això, es pot observar com el flux es manté molt més estable i accelerat al llarg de tota la secció del fons pla del vehicle preparat pel DTM. Aquesta estabilitat proporciona unes millores en la càrrega aerodinàmica i en el rendiment general del vehicle.

En la imatge que es mostrarà a continuació es podrà observar la comparació de les pressions al llarg del fons del dos vehicles i s'observarà clarament els beneficis que aporta una velocitat del flux més estable.



Il·lustració 131: Comparació de les pressions en el fons dels vehicles.

Com es pot veure en la il·lustració 131, en el cas de les pressions encara s'observa millor com, tot i que la depressió en el fons del vehicle de sèrie (dreta) és més elevada en un punt concret degut a l'acceleració sobtada que es produeix en el contacte del flux d'aire amb les protrusions que simulen el fons abrupte d'un cotxe de sèrie, la depressió total que es genera en el fons del turisme del DTM és molt més elevada gràcies a l'estabilitat i la velocitat que el perfil d'aquest proporciona al flux d'aire.

En el fons del vehicle de fabricació en sèrie s'observa com els valors de la pressió varien molt e inclús són positius en la part frontal, generant sustentació positiva i molta inestabilitat, mentre que en el model CAD s'observa una depressió molt constant que comença gràcies a la funció de control del flux que realitza el splitter.

Així doncs, es pot afirmar que el valor màxim de depressió no representa la funció general que el fons pla du a terme, juntament amb el splitter i el difusor, i que es necessari estudiar tota la secció per entendre que el fons pla dota al vehicle d'una càrrega aerodinàmica molt eficaç i constant que permet al vehicle tindre una gran estabilitat.

11. PLANIFICACIÓ DEL PROJECTE

PLANIFICACIÓ DEL PROJECTE

Un cop finalitzat el projecte es presenta un estudi temporal del temps dedicat a cada una de les parts del projecte mitjançant una taula amb les hores dedicades a cada secció i un diagrama tipus Gantt.

El total del projecte s'ha dividit en les següents parts:

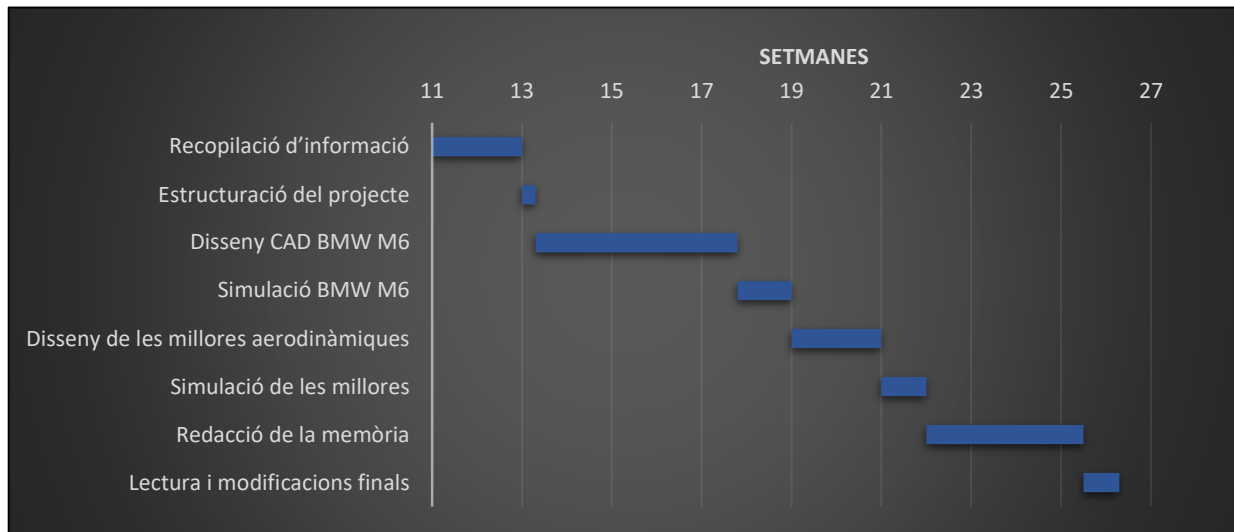
1. **Recopilació d'informació.**
2. **Estructuració de les parts del projecte.**
3. **Disseny CAD Cotxe de sèrie.**
4. **Simulació Cotxe de sèrie.**
5. **Disseny CAD Millores aerodinàmiques.**
6. **Simulació cotxe DTM.**
7. **Redacció de la Memòria.**
8. **Lectura de la memòria i modificacions finals.**

A continuació es mostra una taula amb les hores aproximades dedicades a cada una de les parts del projecte comentades.

Temps	
Recopilació d'informació	40h
Estructuració del projecte	6h
Disseny CAD BMW M6	90h
Simulació BMW M6	24h
Disseny de les millores aerodinàmiques	40h
Simulació de les millores	20h
Redacció de la memòria	70h
Lectura i modificacions finals	16h
Altres	20h
TOTAL	326h

Es pot observar clarament que la part on és hores s'ha dedicat ha estat al disseny i modelació del cotxe de sèrie i de les posteriors millores aerodinàmiques que s'han anat introduint. Això ha estat degut a la falta d'experiència en la modelació de superfícies i tots els problemes que han anat sorgint amb aquestes.

A continuació es mostra un diagrama de Gantt de la repartició aproximada de les hores dedicades a cada una de les parts del projecte i l'ordre en que s'han fet.



Il·lustració 132: Diagrama de Gantt del temps dedicat al projecte.

Cal comentar que em vaig ficar a fer el projecte a fons a partir de la segona setmana de març (setmana 11), a partir de la qual vaig començar a dedicar una mitjana de 4h al dia de dilluns a divendres. Les hores s'han intentat fer el màxim de quadrades possible per tal de donar una idea aproximada del temps dedicat al projecte.

A primera vista ressalta clarament que els apartats on mes hores he dedicat han estat tant en el disseny CAD com en la redacció del projecte.

La part de la simulació també ha sigut una part amb bastanta feina tot i que en el diagrama no es veu tant clarament ja que he dividit les parts de simulació de cada un dels models CAD.

Vull ressaltar també que la part de recopilació d'informació ha estat bastant extensa ja que també he inclòs en aquest apartat el temps dedicat a la descàrrega i aprenentatge del programa de simulació.

Per acabar, comentar que la part d'estructuració del projecte consistia en la programació dels diferents apartats de la memòria i l'organització de les fases a seguir. En aquesta fase, per tant, es quan es fa fer l'índex de la memòria amb tots els apartats i subapartats ja inclosos. Aquesta programació prèvia m'ha fet estalviar molt temps de redacció ja que al començar ja tenia clar tots i cada un dels apartats.

12. CONCLUSIONS

L'objectiu principal d'aquest projecte era la realització d'un estudi aerodinàmic enfocat al món de la competició automobilística i, més concretament, enfocat a la competició de turismes més important del món com és el DTM que enfoqués des de la evolució històrica dels apèndixs aerodinàmics fins a l'evolució de les competicions automobilístiques o dels estudis aerodinàmics. Així doncs, la finalitat principal d'aquest estudi era la de simular el comportament del flux d'aire a través de la carrosseria d'un vehicle de sèrie i la posterior comparació amb el mateix model però de competició per tal d'entendre el funcionament dels diversos elements aerodinàmics utilitzats en les competicions automobilístiques.

Així doncs i, un cop finalitzat el projecte, es pot confirmar que s'han complert tots els objectius establerts inicialment. S'ha estudiat la història de les competicions automobilístiques així com dels elements emprats en la millora de les prestacions dels vehicles, s'han estudiat les principals lleis emprades en el camp de l'aerodinàmica, s'ha explicat i teoritzat sobre el funcionament dels diversos elements aerodinàmics emprats en les competicions automobilístiques, s'ha dissenyat el un model de vehicle de carrer al qual posteriorment se l'hi han afegit una sèrie de components aerodinàmics per habitar-lo a la competició i finalment s'ha simulat el comportament del flux d'aire en ambdós models CAD i s'han extret una valors adinàmics que posteriorment s'han valorat i comparat .

Durant el projecte he après a dissenyar superfícies complexes augmentat els coneixements en disseny CAD adquirits al llarg dels anys de grau en enginyeria mecànica.

Amb les simulacions realitzades s'han pogut comprovar i confirmar el funcionament dels elements estudiats així com les teories físiques en que es basen aquests components. S'ha pogut comprovar, també, el funcionament de l'efecte terra i la gran càrrega aerodinàmica que el fons pla és capaç de generar en un vehicle. S'ha pogut veure el funcionament també, del principi de Bernoulli en molts dels components aerodinàmics com el fons pla, el difusor, però, sobretot, en la circulació del flux d'aire al voltant de l'aleró posterior, el qual amb el perfil invertit de l'ala d'un avió. També s'ha pogut entendre com es comporta l'aire al voltant d'un vehicle i quines pressions se'n deriven.

Per acabar s'han pogut observar i analitzar les grans diferències que hi ha entre un vehicle de carrer i un turisme de competició. S'ha entès com molts dels elements que generen una gran quantitat de càrrega aerodinàmica no són viables en turismes de fabricació en sèrie degut a l'increment de Drag que se'n deriva i les conseqüències que això comporta.

13. BIBLIOGRAFÍA

1. **McBeath, Simon.** *Aerodinámica del automóvil de competición.*
2012. **Tablado, Fernando.** MOTOR A FONDO. [En línia] 2 / Desembre / 2014. <https://www.motorafondo.net/la-aerodinamica-en-los-coches-historia-y-evolucion/>.
3. *Diseño aerodinámico de un túnel de viento de bajas velocidad.* **C. A. Quispe Gonzáles, W. J. Urcuhuaranga Esteban i J. E. Chiroque Baldera.** 2014, Revista de Investigación de Física, p. 1-12.
4. **W-H.** *Aerodynamics of Road Vehicle - 4th edition.* Warrendale, PA, USA : SAE, Society of Automotive Engineers, 1998.
5. **JR, ANDERSON.** *Fundamentals of Aerodynamics - 3rd Edition.* NY : s.n., 2001.
6. **Abbott, Ira H. i A.E.Von Doenhoff .** *Theory of Wing Sections.* s.l. : Dover Publications Inc, 1960.
7. **WHITE, F. M.** *Mecánica de Fluidos.* Madrid : McGRAW-HILL, 2004.
8. **Design, Flow.** YouTube. *Autodesk Flow Design - How to Use Flow Lines.* [En línia] 2 / Febrer / 2014. <https://www.youtube.com/watch?v=KUz0G09TGrl>.
9. **Hudspeth, Mike.** Engineers Rule. *Surface Modeling with SOLIDWORKS.* [En línia] 18 / Febrer / 2016. <https://www.engineersrule.com/surface-modeling-with-solidworks/>.
10. **Wikipedia.** *Consultes varies sobre aerodinàmica.* [En línia] <https://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Portada>.
11. **Motor.es.** *Consultes Varies.* [En línia] <https://www.motor.es/>.
12. **DTM.** *Consultes Varies.* [En línia] <https://www.dtm.com/>.
13. **Competición.** *Consultes Varies.* [En línia] <https://www.diariomotor.com>.
14. **Mancebo, Adrián.** AutoBild. *Técnica F1: ¿qué es el efecto suelo?* [En línia] 30 / Juny / 2015. <https://www.autobild.es/motorsport/tecnica-f1-que-es-efecto-suelo-258303>.
15. **ForoCoches.** *Aerodinamica de los coches: el aleron y el difusor.* [En línia] 3 / abril / 2010. <https://www.forocoches.com/foro/showthread.php?t=1650311>.